

# PREMIÈRE RENCONTRE D'INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE MULTILATÉRAL

Cindy Bellanger, Serge Monneret,  
Adrien Stolidi & Jérôme Primot

11 & 12 Mai 2023 | CEA Saclay



PHASICS  
the phase control company



# Session 1: Les fondamentaux

*Chairman : Jérôme Primot*

- *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes. **Jean-Christophe Chanteloup**, LULI*
- *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope. **Serge Monneret**, Institut Fresnel*
- *PISTIL, **Cindy Bellanger**, ONERA*
- *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X. **Adrien Stolidi**, CEA*

# Session 1: Les fondamentaux

*Chairman : Jérôme Primot*

- *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes. **Jean-Christophe Chanteloup**, LULI*
- *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope. **Serge Monneret**, Institut Fresnel*
- *PISTIL, **Cindy Bellanger**, ONERA*
- *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X. **Adrien Stolidi**, CEA*

# L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes.

J.-C. Chanteloup

*Première rencontre  
d'Interférométrie à  
Décalage  
MultiLatéral*

11 & 12 Mai 2023, Saclay



# Senseur de phase : définition

---

Un senseur de phase est un dispositif évaluant l'écart de chemin optique  $\Delta$  existant entre au moins deux points de son champ de mesure

Cet écart possède la dimension d'une longueur et s'exprime généralement en **microns**.

Une convention pratique consiste à exprimer  $\Delta$  en **fractions de  $\lambda$** , où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de l'onde lumineuse associée à la phase mesurée par le senseur.

Par exemple, si  $\lambda$  vaut 1,064  $\mu\text{m}$ , un écart de chemin optique de  $3\lambda$  équivaut à 3  $\mu\text{m}$  environ.

La phase s'exprime quant à elle **en radians** et est reliée à  $\Delta$  par la relation suivante :

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(x, y) \text{ où } x \text{ et } y \text{ sont les coordonnées transverses du faisceau.}$$

# Plan de l'exposé

---

- *L'Equation de Transfert en Intensité (ETI)*
- *Utilisation de l'effet lentille : Senseur de courbure*
- *Utilisation de l'effet prisme : La famille Hartmann*
- *Interférométrie à 3 et 4 ondes*
- *Reconstruction*

# Amplitude complexe du champ électrique d'une onde lumineuse

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \cdot e^{i(\omega t - k \cdot r)} \cdot \vec{u}$$

Amplitude réelle      Phase      Polarisation

Une expression scalaire à un instant  $t$  en fonction de la distribution d'éclairement  $I(\vec{r})$

$$E(x, y) = \sqrt{I(x, y)} \cdot e^{i\phi(x, y)}$$

Les détecteurs quadratiques ne sont sensibles qu'au carré du champs, c'est-à-dire  $I(x, y)$ .  
Ils ne permettent donc pas d'avoir accès directement à la phase.

L'idée consiste à mesurer les variations de  $I(x, y)$  pendant la propagation (*variations essentiellement liées à la phase*) afin d'obtenir la phase.

# Equation de transfert en Intensité

Il existe un grand nombre de dispositifs d'analyse de surface d'onde qui sont tous basés sur ce même principe :  
**Le front d'onde est déduit de l'observation des variations de l'intensité lors de la propagation de l'onde analysée.**

Ce phénomène est formalisé avec la théorie de l'**Equation de Transfert en Intensité**.

(M. Teague, J. Opt. Soc. Am. A, Vol2, N°11, Nov 1985 )

Dans le domaine d'application de la théorie de la diffraction de Fresnel, la relation entre les amplitudes complexes dans deux plans transverses de positions  $O$  et  $z$  est donnée par la relation de Fresnel :

$$A_z(x, y) = e^{ikz} A_o(x, y) \otimes \frac{e^{i\pi \frac{(x^2+y^2)}{\lambda z}}}{i\lambda z} \quad \text{avec} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



# Equation de transfert en Intensité

L'amplitude  $A_z(x,y)$  telle qu'exprimée sous la forme précédente est la solution générale de l'équation différentielle paraxiale :

$$\left( i \frac{d}{dz} + \frac{\nabla^2}{2k} + k \right) A_z(x, y) = 0$$

où  $i \frac{d}{dz} + \frac{\nabla^2}{2k} + k$  est l'opérateur de Fresnel et  $\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}$

Sachant que l'éclairement est égal au carré du champ:  $I = A(x,y).A^*(x,y)$ , on obtient (via deux petites pages de calcul) :

$$-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial I}{\partial z} = I \nabla^2 \Phi + \vec{\nabla} I \cdot \vec{\nabla} \Phi$$

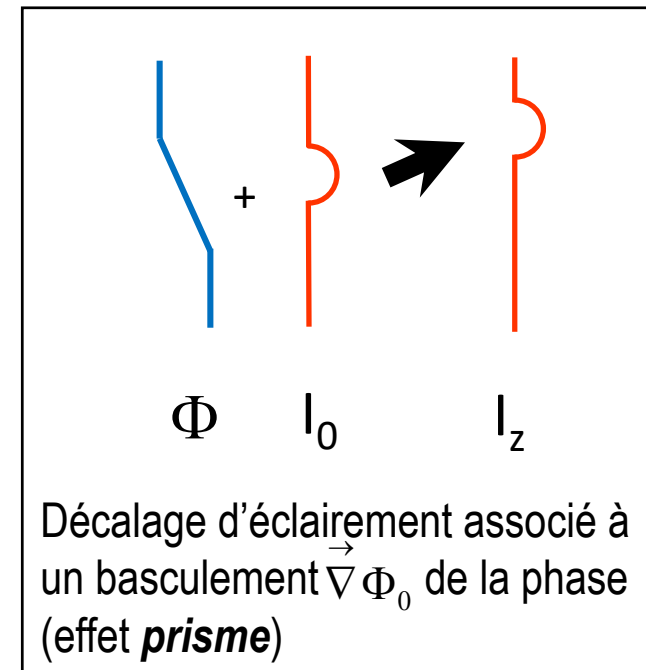
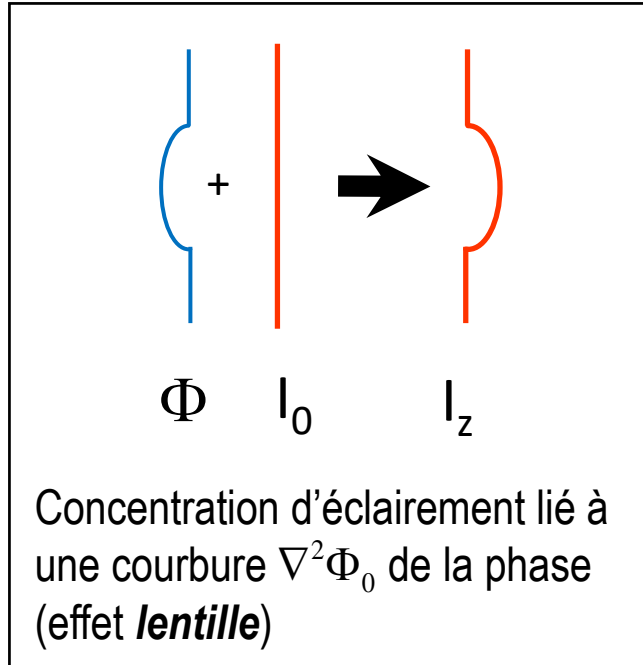
Equation de Transfert en Intensité (ETI)

$$\text{soit } -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial I}{\partial z} = I \left( \frac{d^2 \Phi}{dx^2} + \frac{d^2 \Phi}{dy^2} \right) + \frac{dI}{dx} \frac{d\Phi}{dx} + \frac{dI}{dy} \frac{d\Phi}{dy}$$

# Equation de Transfert en Intensité : interprétation physique

En intégrant l'équation de transfert,  
on obtient une équation qui traduit la conservation de l'énergie d'une onde lors de sa propagation :

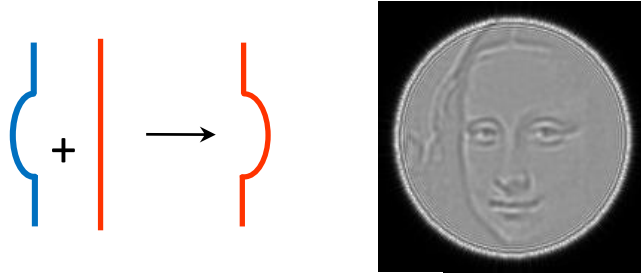
$$I_z(x, y) = I_0(x, y) - \frac{\lambda z}{2\pi} \left( I_0 \nabla^2 \Phi_0 + \vec{\nabla} I_0 \cdot \vec{\nabla} \Phi_0 \right)$$



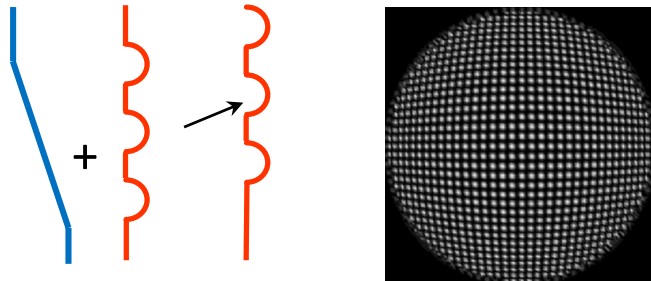
# Equation de transfert en Intensité : recouvrement de la phase

Deux stratégies s'offrent donc à nous pour recouvrer la phase:

Observation des variations d'intensité dues aux courbures locales du front d'onde, pendant la propagation: utilisation de l'*Effet lentille* (Ombroscopie, senseur de courbure,...)



Création d'un motif périodique d'intensité dans le faisceau analysé et observation des distorsions locales lors de la propagation. Les distorsions sont liées aux basculements locaux du front d'onde : Utilisation de l'*Effet prisme* (Senseurs de Hartmann et variations, interférométrie à décalage latéral (lateral shearing interferometry), déflectométrie ...)



# Achromaticité

---

Introduisons la différence de marche  $\Delta$  en lieu et place de la phase:  $\Phi \rightarrow \Delta$ , avec  $\Phi = 2\pi \Delta / \lambda$

$$-\frac{\partial I}{\partial z} = I \nabla^2 \Delta + \vec{\nabla} I \cdot \vec{\nabla} \Delta$$

Si la modulation de l'éclairement et la différence de marche sont indépendantes de la longueur d'onde, alors la variation de  $I$  lors de sa propagation en  $z$  est elle aussi indépendante de  $\lambda$ :

→ Une mesure en lumière blanche devient possible.

Dans le cas de la famille « **Prisme** », afin de préserver l'achromatisme, il faut trouver un moyen achromatique d'introduire la modulation périodique d'intensité dans le faisceau analysé (par exemple, introduire une simple grille).

A contrario, les systèmes interférométriques ayant recours à des lames séparatrices (lame de « shearing », Michelson, ...) ne sont pas achromatiques (dépendance de l'interfrange avec  $\lambda$ ).

---

La différence de marche  $\Delta$  est indépendante de  $\lambda$   
pour les défauts d'un miroir ou encore la turbulence atmosphérique (au 1er ordre).

Pour les lasers à impulsions courtes, le spectre lumineux est large  
et la mesure de phase n'est satisfaisante qu'avec des senseurs achromatiques.

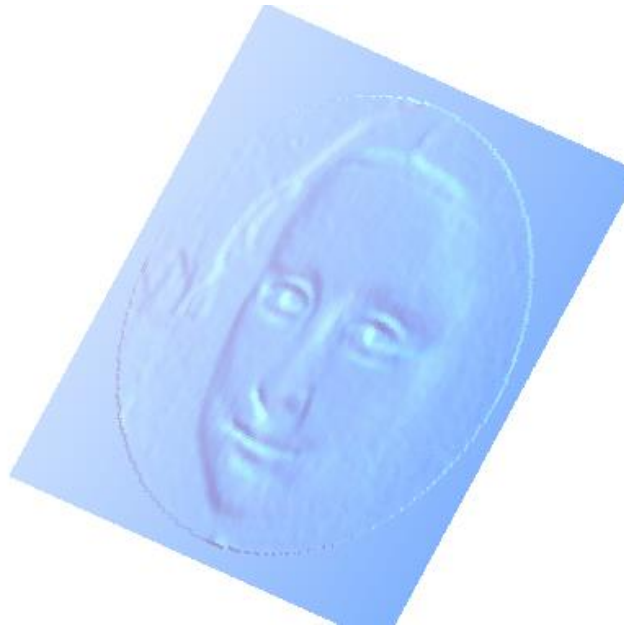
# Le senseur de courbure (effet lentille) : Le miroir magique chinois

Le miroir magique chinois est un miroir métallique légèrement martelé pour obtenir un motif en relief, avec une amplitude de l'ordre du micron.

Les niveaux de gris sont donc convertis en élévation.

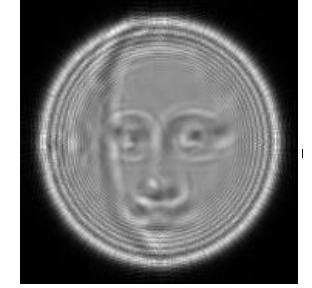


Phi

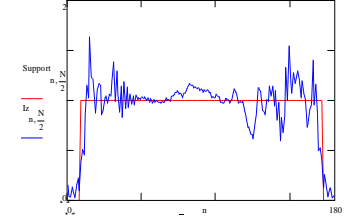
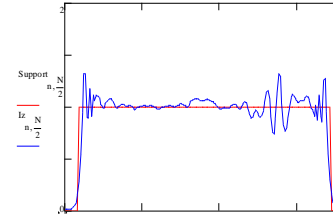
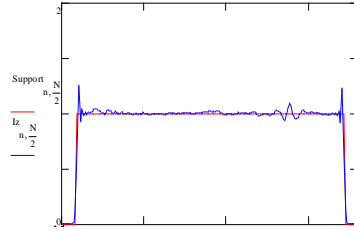
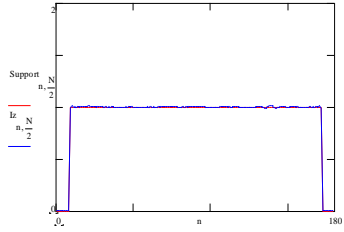


Miroir

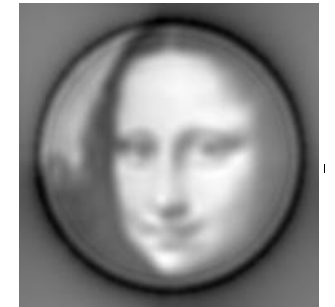
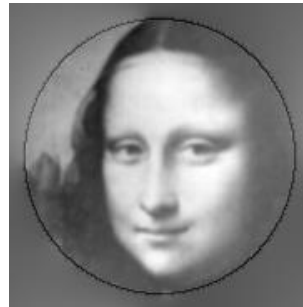
# Le senseur de courbure (effet lentille) : Le miroir magique chinois



Observation en réflexion d'une source à l' $\infty$  : l'intensité réfléchie est projetée sur un mur, pour des distances croissantes



Coupes diamétrales

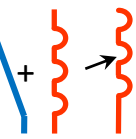


Visu Mona

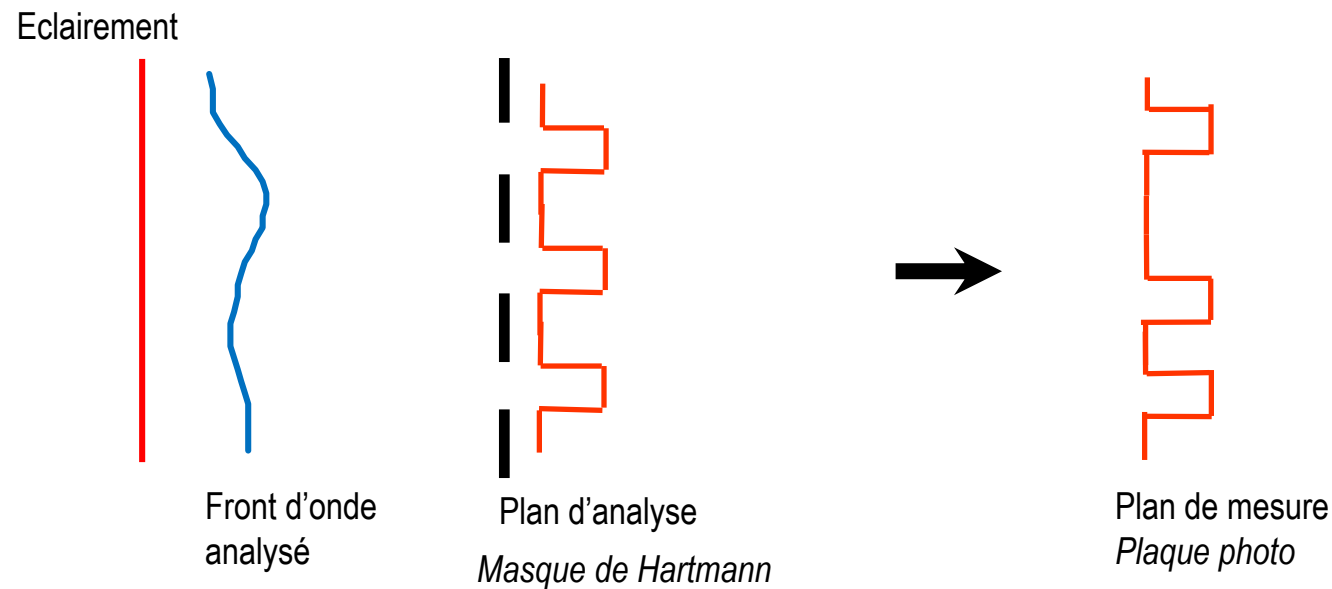
Reconstruction à partir de la cartographie des courbures (double intégration)

$$I_z(x, y) = I_0(x, y) - \frac{\lambda z}{2\pi} \left( I_0 \nabla^2 \Phi_0 + \vec{\nabla} I_0 \cdot \vec{\nabla} \Phi_0 \right)$$

# Variations on a Hartmann theme (effet prisme)



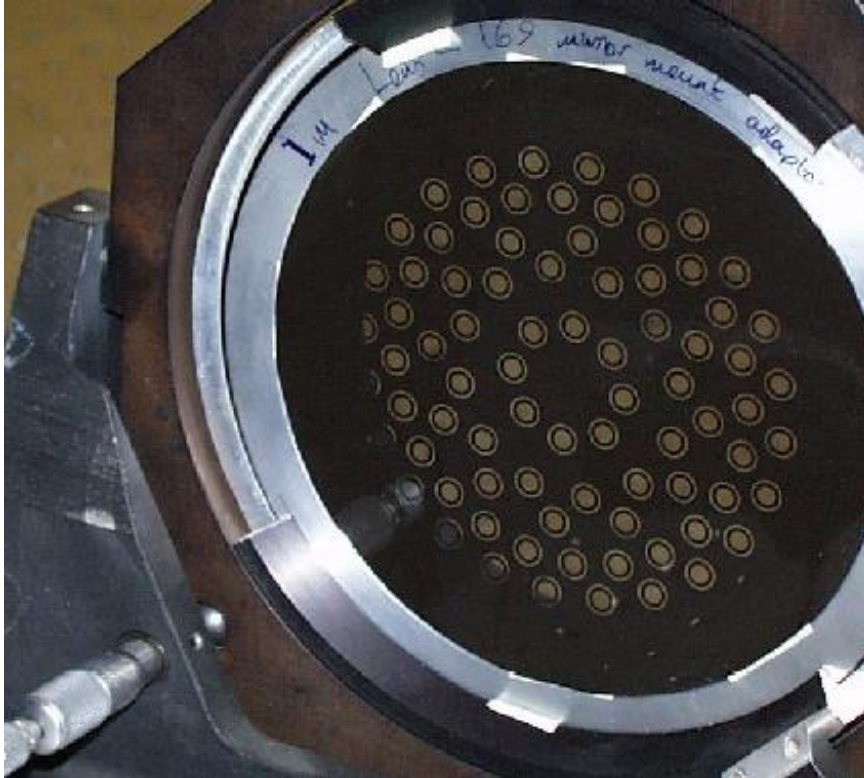
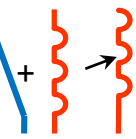
Le Principe repose sur l'introduction d'une modulation périodique de l'intensité du faisceau analysé. Le système le plus simple consiste à insérer une grille bi-périodique (un masque perforé) dans le plan où l'analyse est effectuée.



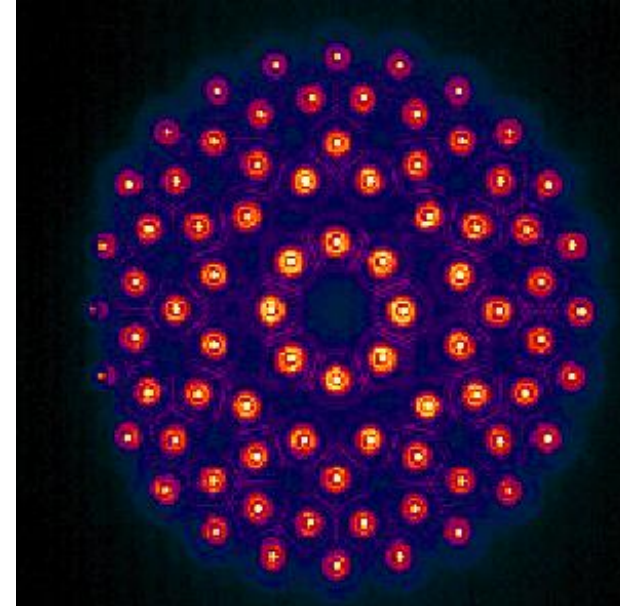
Proposé par Hartmann en 1900

Hartmann, "Bemerkungen über den Bau und die Justirung von Spektrographen", Z. Instrumentenk. 20:47 (1900).

# Illustration : Hartmann à zone de Fresnel



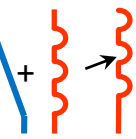
Plaque de Hartmann à zone de Fresnel



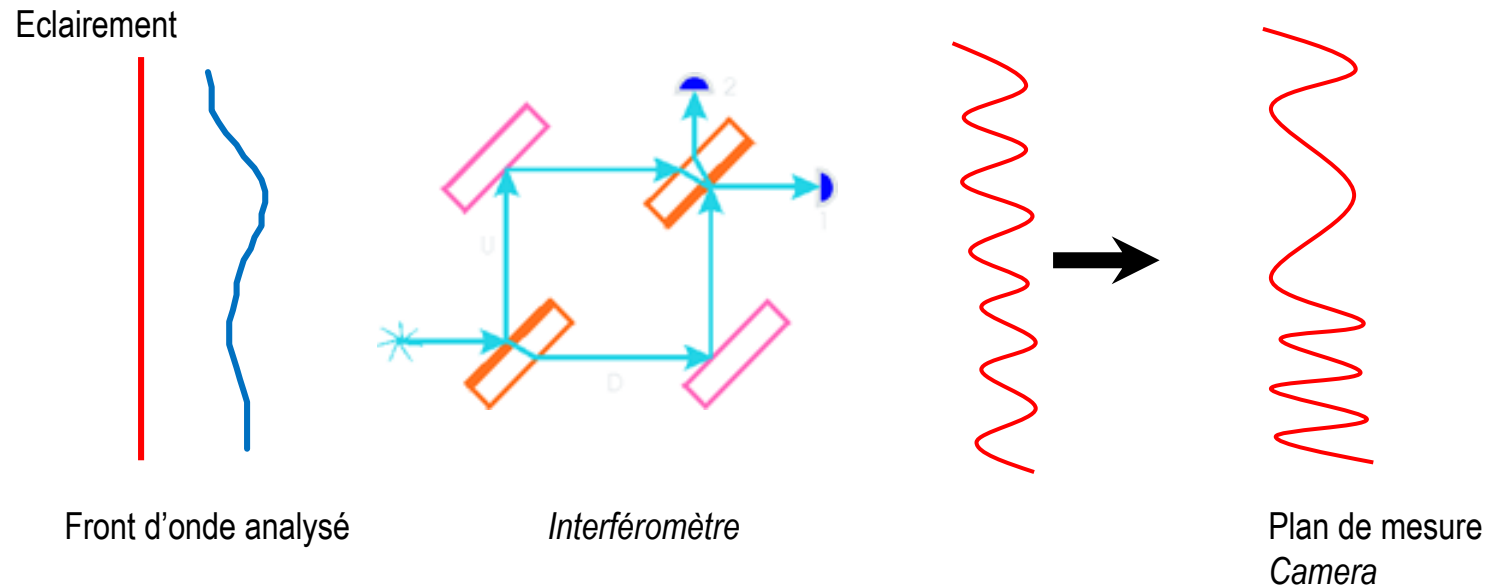
Enregistrement de la distribution d'énergie diffractée



# Variations on a Hartmann theme (effet prisme)



Une approche alternative repose sur l'interférométrie permettant là aussi de générer une modulation d'intensité via une réseau de franges sinusoïdales.



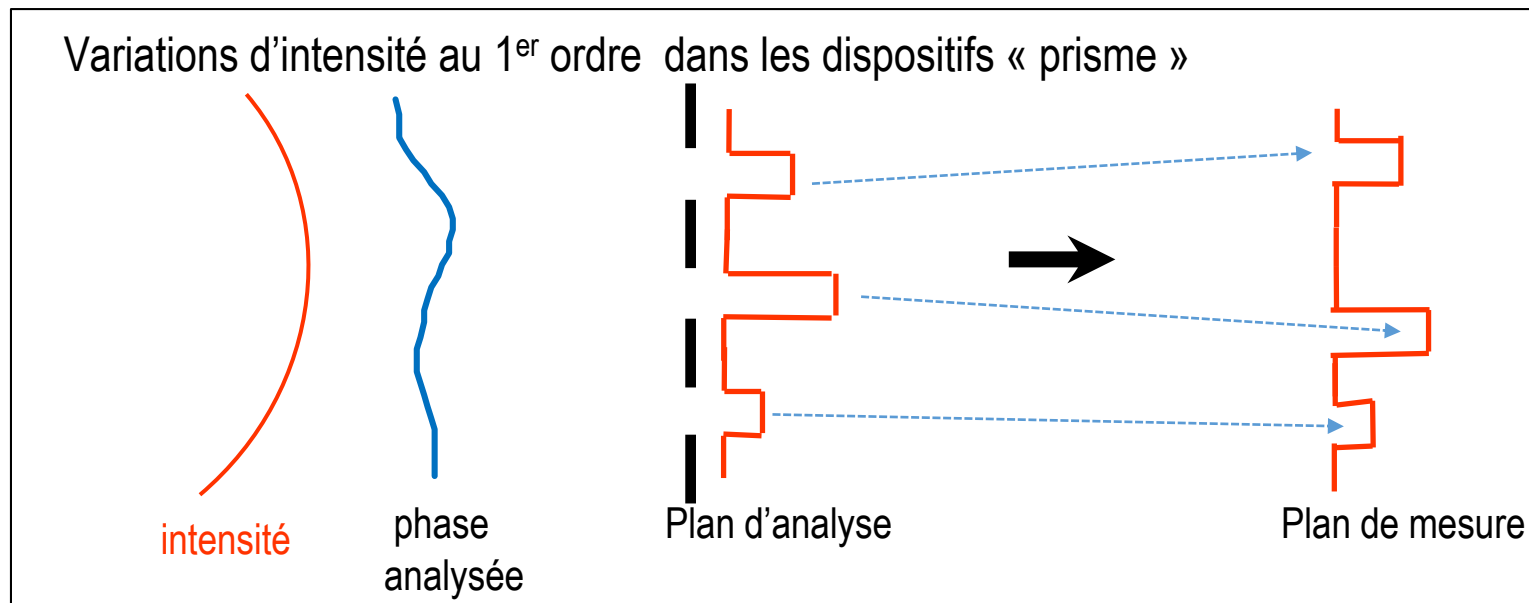
# « Prisme » ou « lentille », comment faire le bon choix ?

Le senseur de courbure est basé sur une mesure de l'intensité:

- Sa simplicité naturelle est contrebalancée par les problèmes de scintillation
- La mesure doit au moins être faite dans deux plans

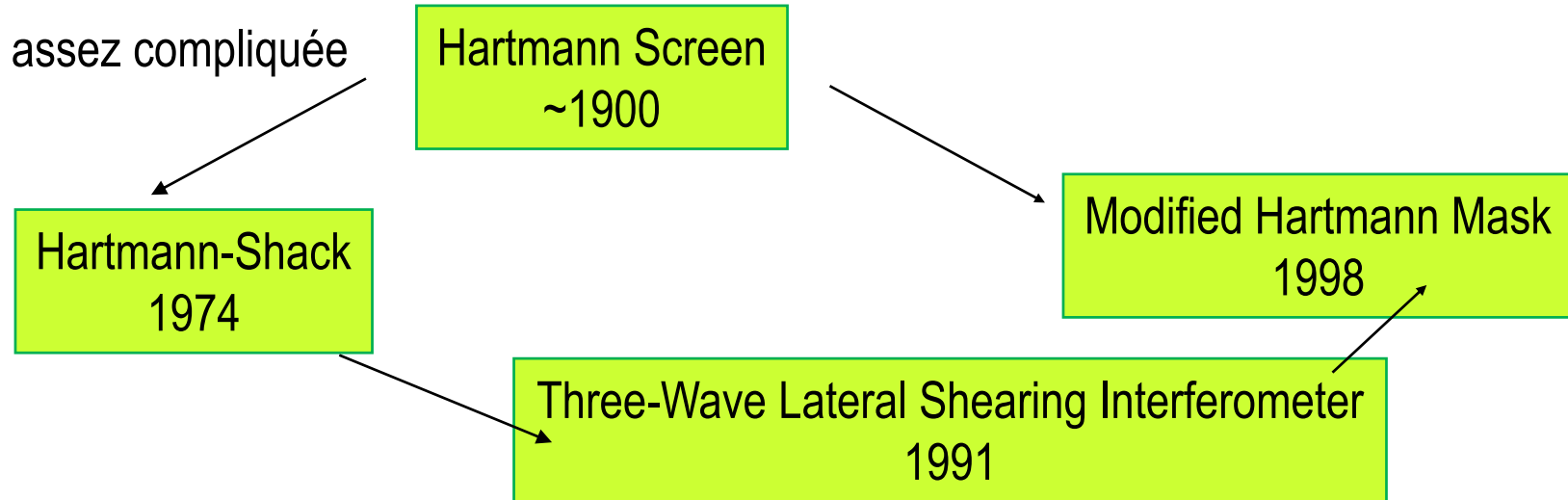
Les dispositifs basés sur l'effet « prisme » s'intéressent aux distorsions d'une fréquence porteuse.

- La complexité induite par l'insertion de la modulation d'intensité dans le faisceau analysé est contre-balancée par une meilleure résistance à la scintillation.



# Généalogie de la famille Hartmann

Une généalogie assez compliquée



Pour les comparer, il faut retenir que :

- Ils sont **tous basés sur le même principe**, donc similaire au 1er ordre :  
l'introduction d'une porteuse en intensité pour mesurer les gradients locaux de la phase.
- Ils diffèrent essentiellement par la **solution technique retenue pour introduire la porteuse**.

# Généalogie de la famille Hartmann

---

Il n'existe pas d'analyseur idéal en absolu. Le choix est conditionné par :

- *Les conditions d'éclairement (bas niveau de lumière, ...)*
- *Le besoin de compacité*
- *Les conditions d'environnement (vibrations, ...)*
- *Le besoin d'achromaticité (impulsions brèves, ...)*
- *Le fonctionnement en temps réel ou différé (optique adaptative, ...)*
- *Métrie, Contrôle, Contrôle / Commande, ...*
- *...et autres contraintes industrielles ...*

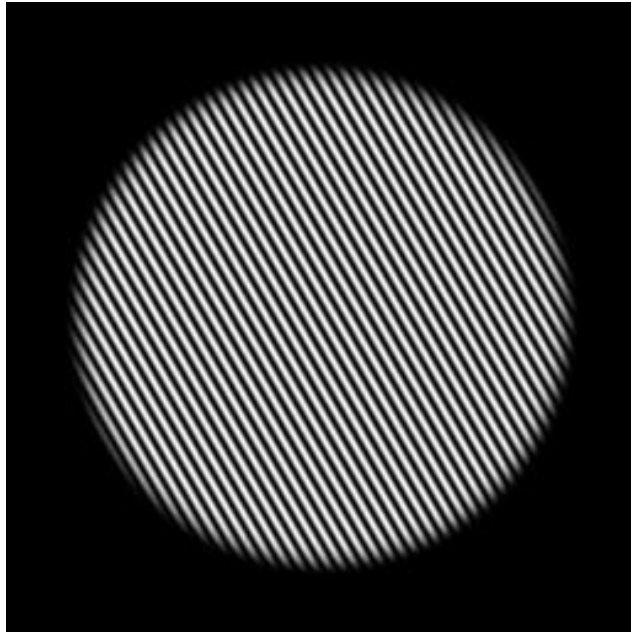
Le bon choix n'est pas strictement conditionné par la performance sur le front d'onde reconstruit.

Attention ! Chacun des membres a été développé dans un contexte spécifique (astronomie, métrologie, contrôle optique, lasers intenses, ...)

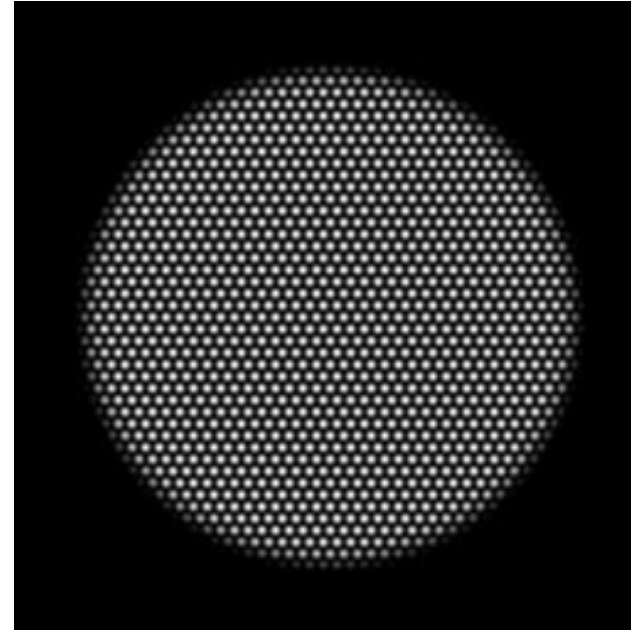
Pour une comparaison objective entre analyseurs, il faut absolument distinguer entre la performance intrinsèque accessible au dispositif et celle atteinte par les dispositifs réalisés à partir de choix industriels particuliers.

# *L'interférométrie multi-ondes permet de disposer de plusieurs gradients*

Figures d'interférences multi-ondes

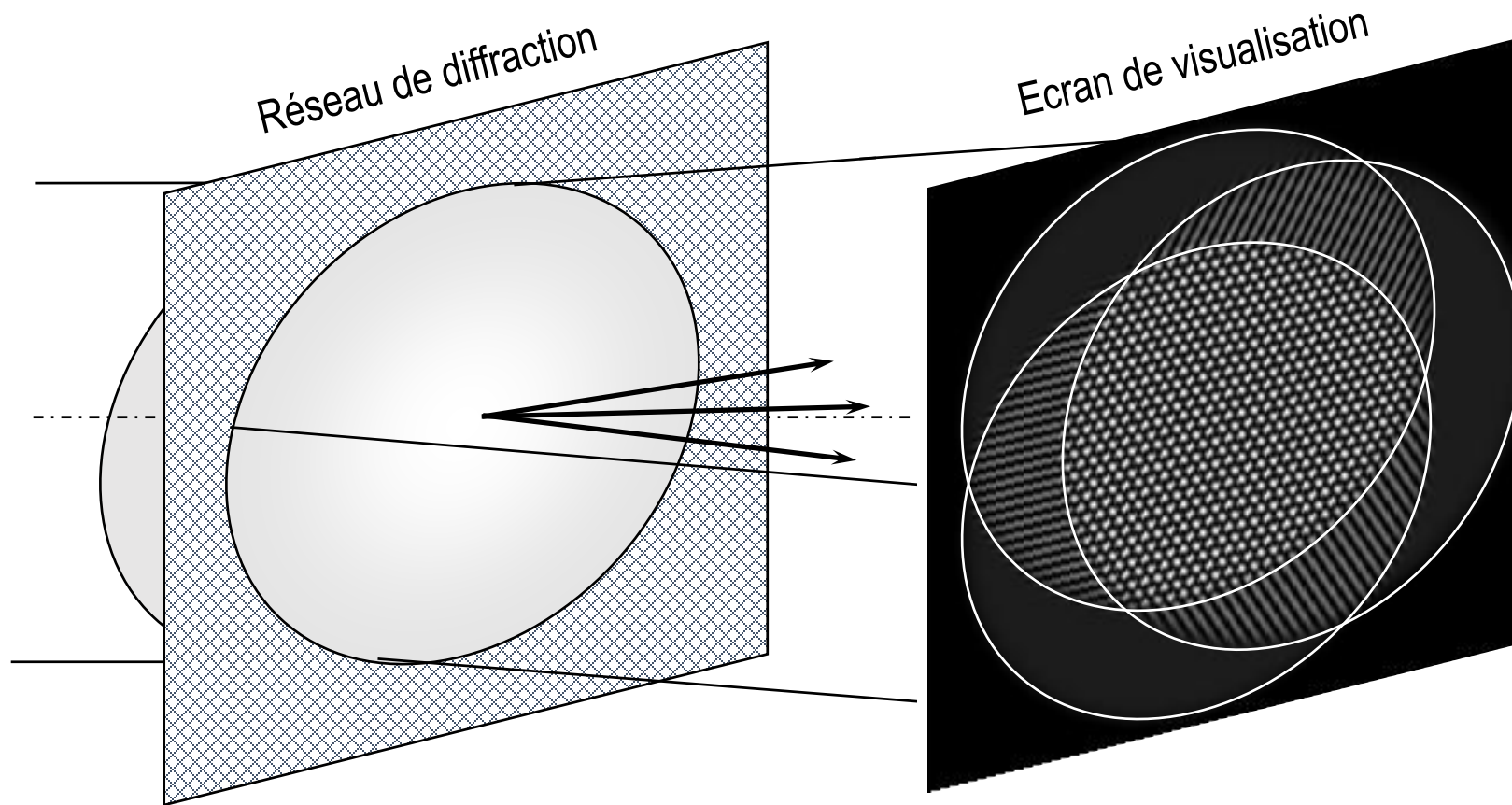


Interférences à deux ondes  
→ un gradient de phase



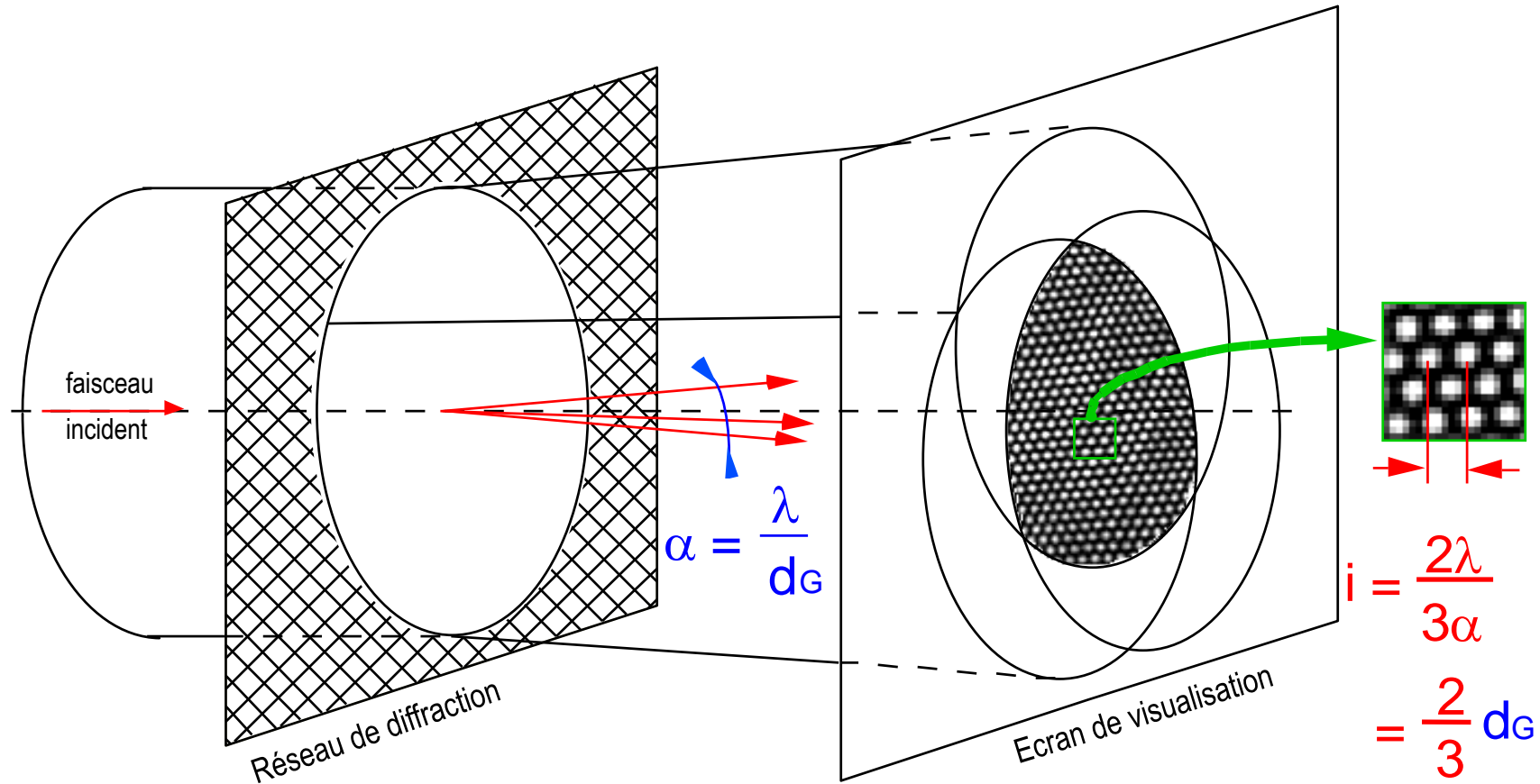
Interférences à trois ondes  
→ trois gradients de phase

# L'Interféromètre à Décalage Tri-Latéral (IDTL)



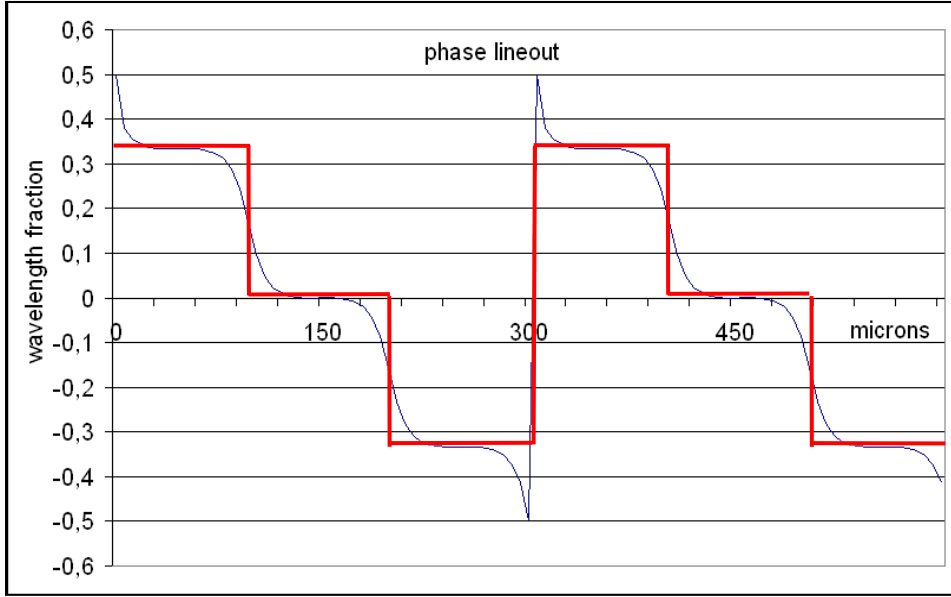
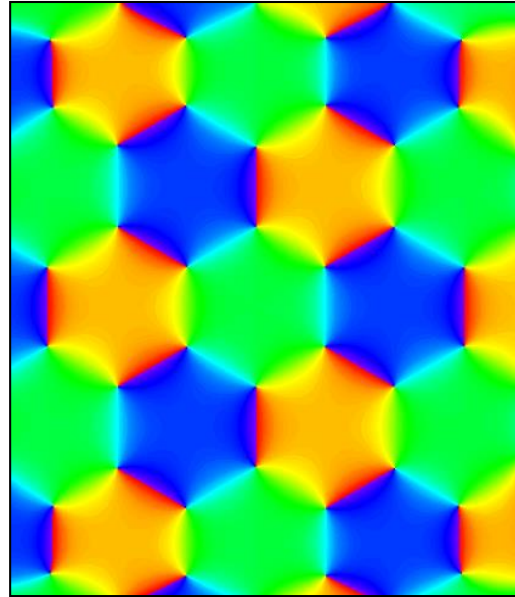
# L'Interféromètre à Décalage Tri-Latéral (IDTL)

La distance inter-franges est indépendante de la longueur d'onde: l'interféromètre est donc achromatique



Les interféromètres à réseau sont achromatiques... ...propriété intéressante pour les impulsions brèves...

# Le réseau de diffraction d'un IDTL

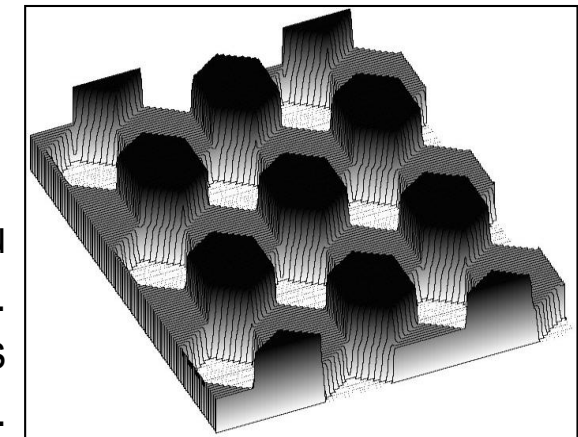


$F^{-1}$  Profil de phase idéal

Distribution focale d'énergie idéale



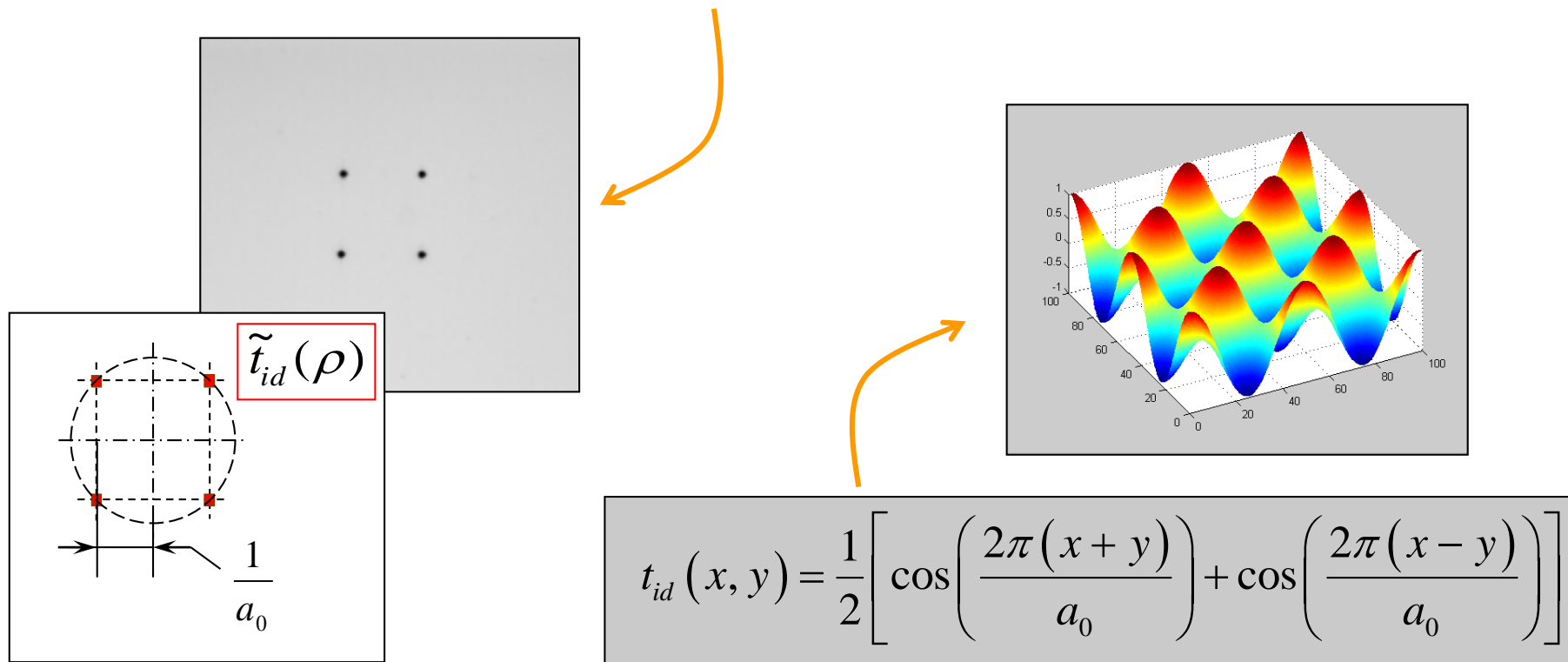
Vue en 3D du profil effectif du réseau réalisé sur un substrat de silice. Les plateaux hexagonaux ont pour altitudes respectives  $\lambda/3$  ou  $2\lambda/3$ .





# Génération d'un réseau de diffraction à 4 ondes : le MHM

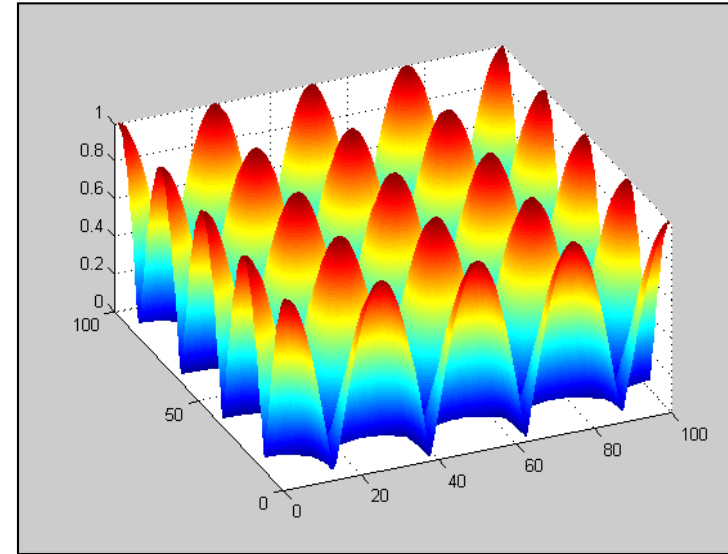
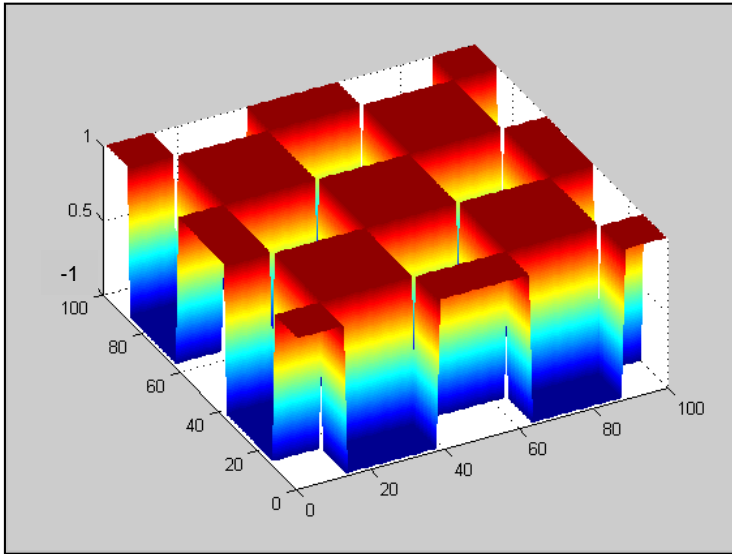
$$\tilde{t}_{id}(\nu, \mu) = \delta\left(\nu - \frac{1}{a_0}, \mu - \frac{1}{a_0}\right) + \delta\left(\nu - \frac{1}{a_0}, \mu + \frac{1}{a_0}\right) + \delta\left(\nu + \frac{1}{a_0}, \mu - \frac{1}{a_0}\right) + \delta\left(\nu + \frac{1}{a_0}, \mu + \frac{1}{a_0}\right)$$



Distribution d'énergie idéale  $\tilde{t}_{id}$  dans le plan de Fourier et transmission associée  $t_{id}$  dans l'espace conjugué.

# Décomposition de la transmission du réseau de diffraction à 4 ondes idéal

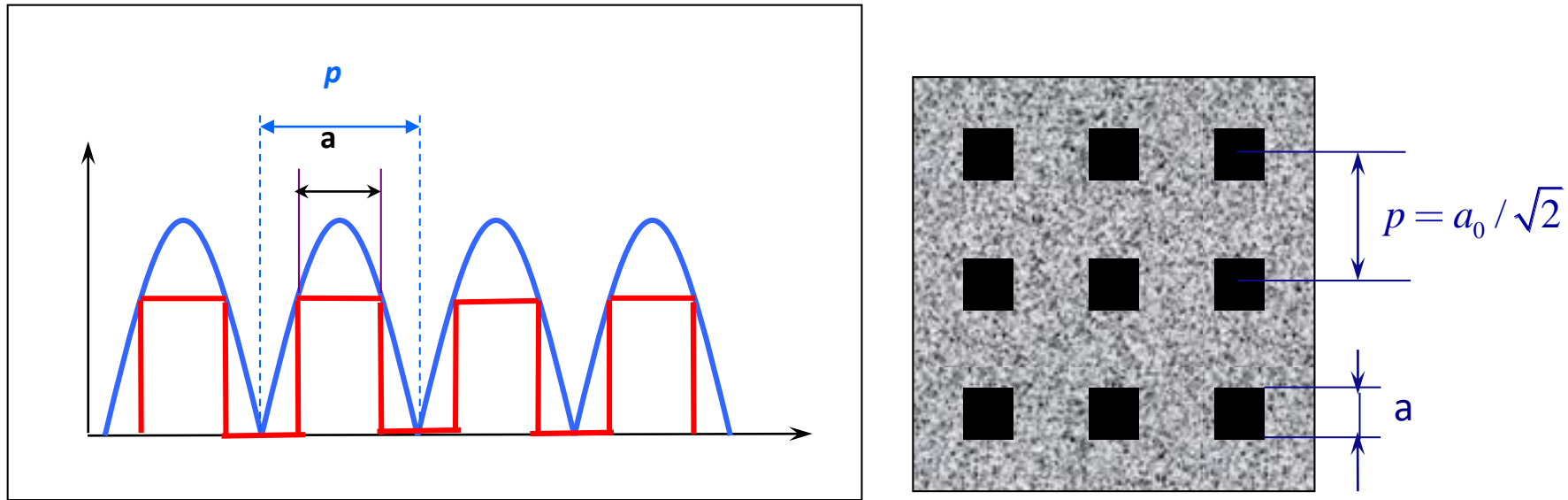
$$t_{id}(x, y) = \text{sign}[t_{id}(x, y)] \cdot \text{abs}[t_{id}(x, y)]$$



Composante “*Signe*” (à gauche) et “*Valeur absolue*” (à droite)  
de la transmission idéale diffractant l’énergie aux quatre sommets d’un carré.

# Approximation de la transmission du réseau de diffraction à 4 ondes idéal

## Composante « Valeur absolue »



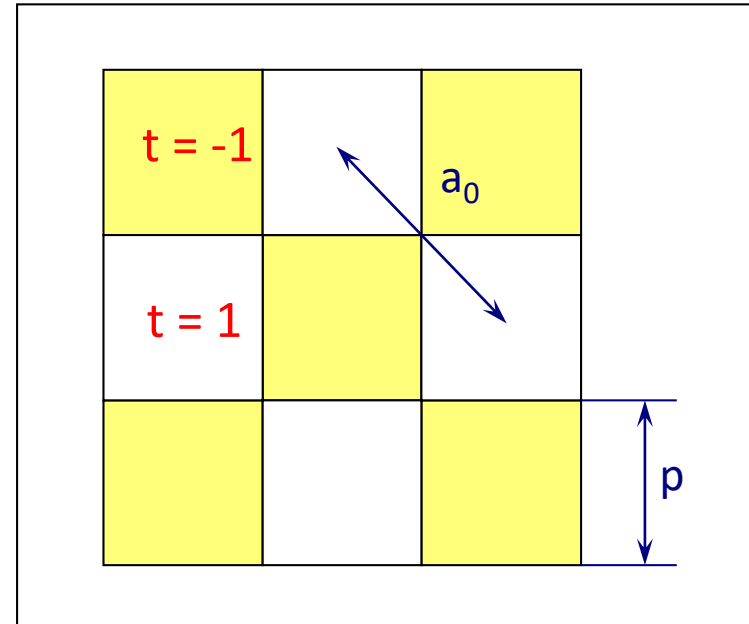
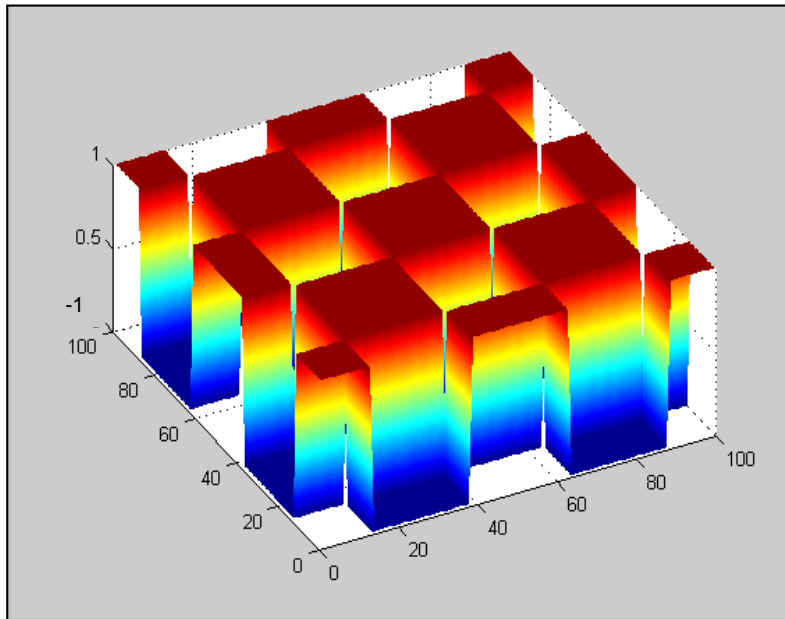
Profil unidimensionnel de  $t_{abs}(x, y) = abs[t_{id}(x, y)]$  (courbe bleue) et son approximation (courbe rouge).

$$t_{abs}^{approx}(x, y) = \Pi_{a,a}(x, y) \otimes \text{Ш}_{a_0/\sqrt{2}}(x) \otimes \text{Ш}_{a_0/\sqrt{2}}(y)$$

# Approximation de la transmission du réseau de diffraction à 4 ondes idéal

## Composante « Signe »

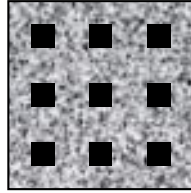
$$t_{sign}(x,y) = \text{sign}[(t_{id}(x,y))]$$



Damier de période  $p$  dont les altitudes sont alternativement -1 et +1.

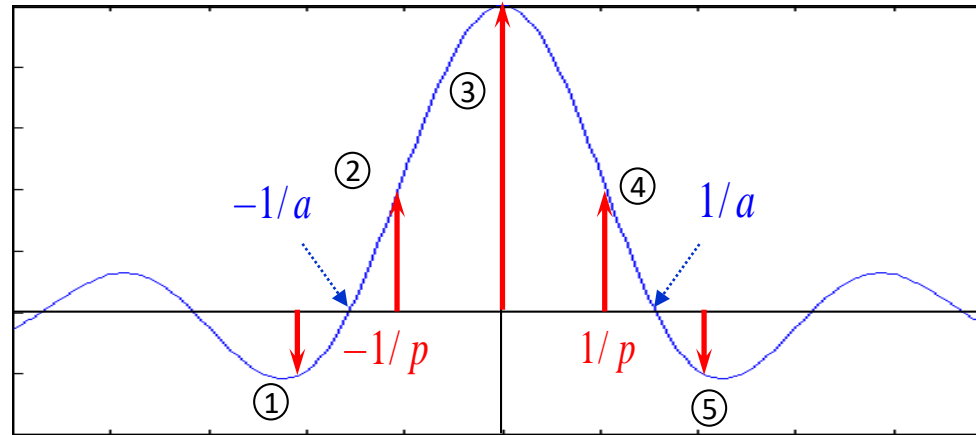
# Description de la composante « Amplitude » du réseau approximé

## Analyse unidimensionnelle



$$t_{abs}^{approx}(x) = \Pi_a(x) \otimes \mathbb{W}_p(x)$$

$$\tilde{t}_{abs}^{approx}(v) = \frac{\sin(\pi va)}{\pi va} \cdot \mathbb{W}_{1/p}(v)$$

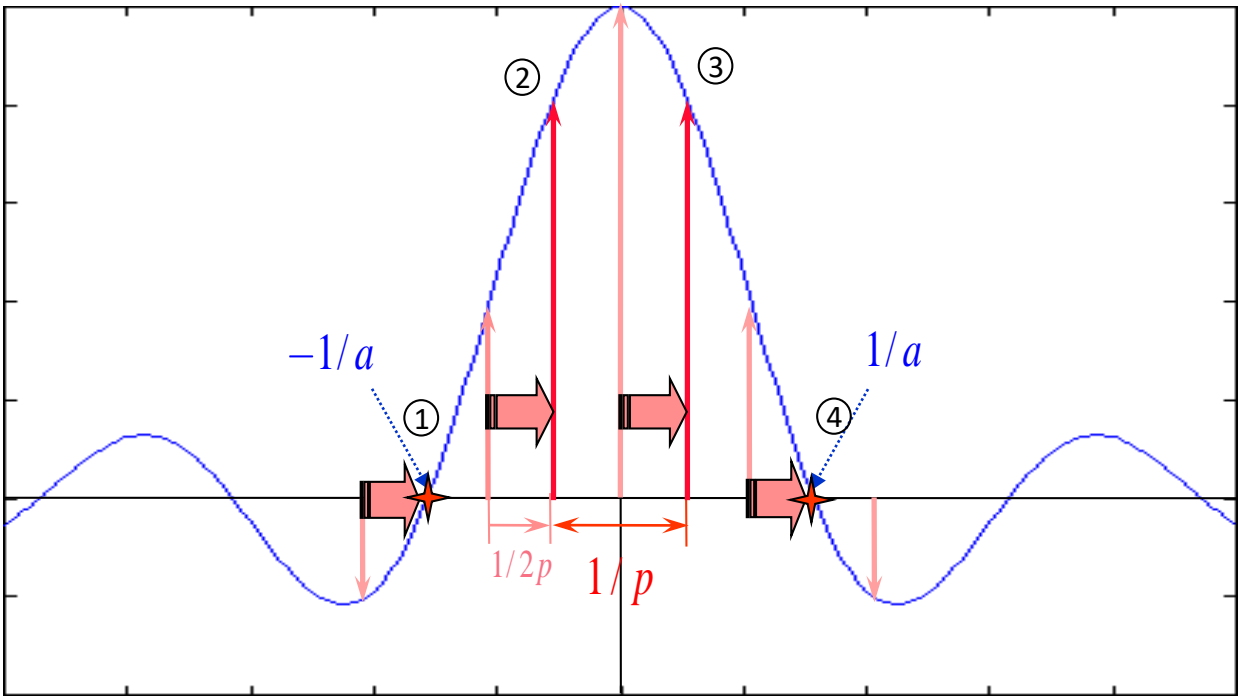
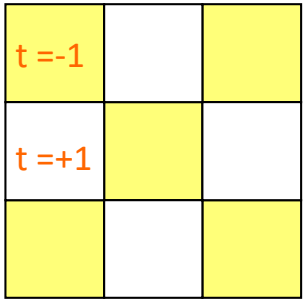
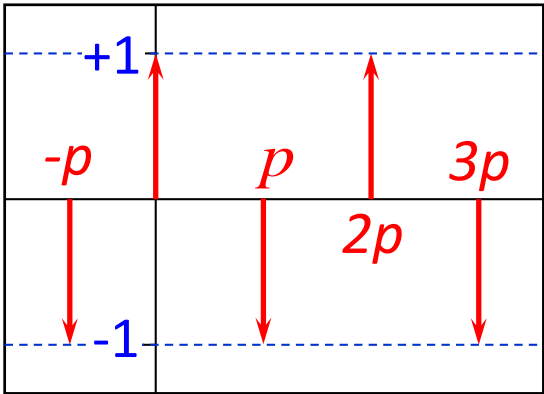


Distribution d'énergie donnée par une plaque de Hartmann d'ouvertures carrées  $a$  et de période  $p$ . L'énergie est localisée aux sommets de chaque flèche (5 d'entre elles sont représentées).

# Description 1D du réseau approximé complet

$$t^{approx}(x) = \Pi_a(x) \otimes [\Psi_p(x) \cdot e^{i\pi x/p}]$$

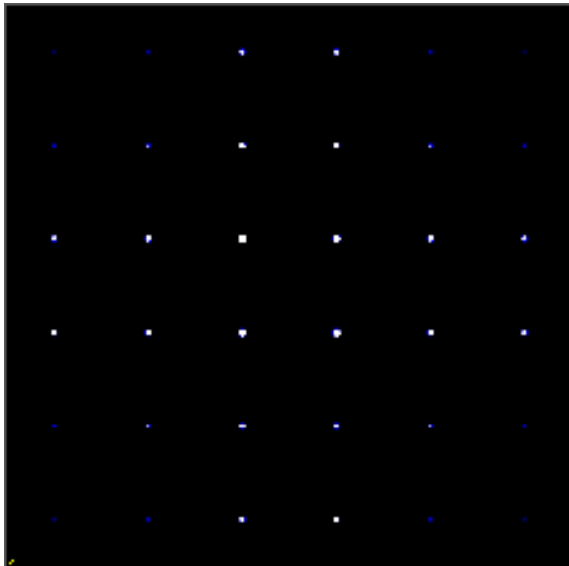
$$\tilde{t}^{approx}(\nu) = \frac{\sin(\pi\nu a)}{\pi\nu a} \cdot \left[ \Psi_{1/p}(\nu) \otimes \delta\left(\nu - \frac{1}{2p}\right) \right]$$



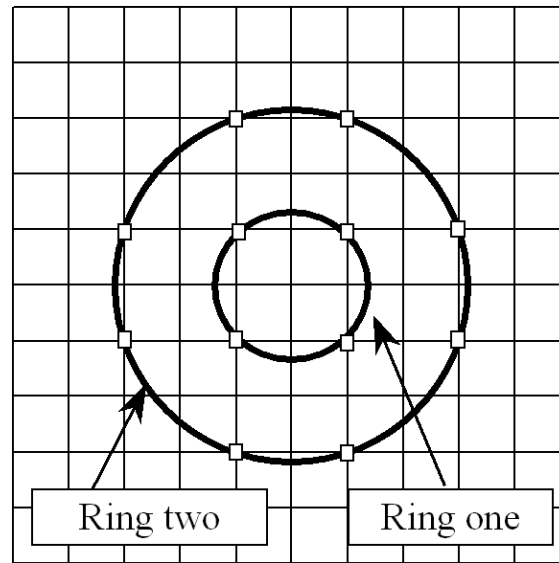
# Ajustement de l'ouverture des trous

Si  $a = \frac{2p}{3}$ , les ordres 2 disparaissent :

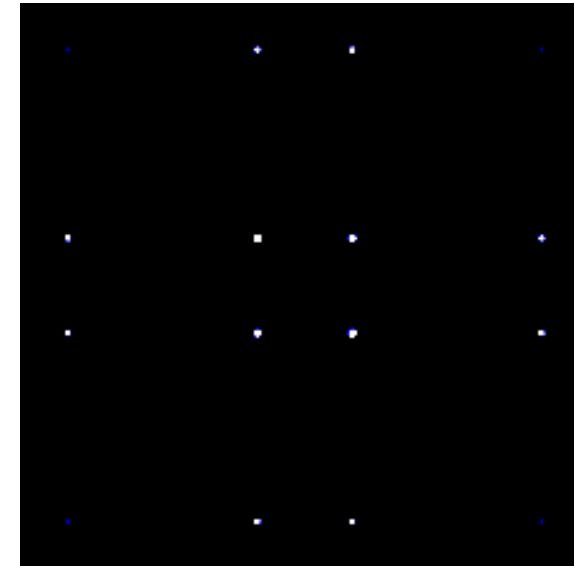
$$a \neq \frac{2p}{3}$$



$$\tilde{f}^{approx}(v, \mu)$$



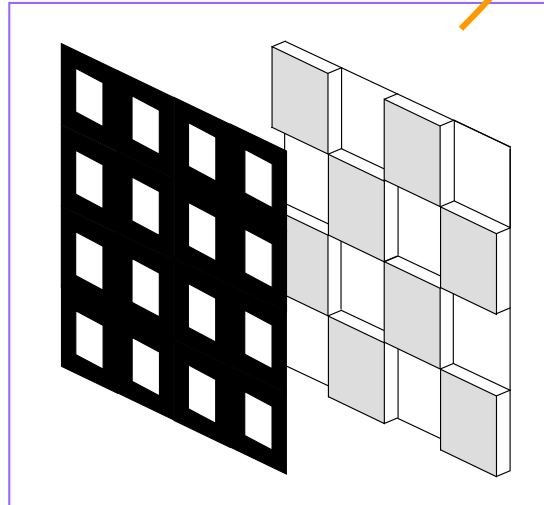
$$a = \frac{2p}{3}$$



# Un senseur de surface d'onde compact



Masque de  
Hartmann Modifié  
(MHM)



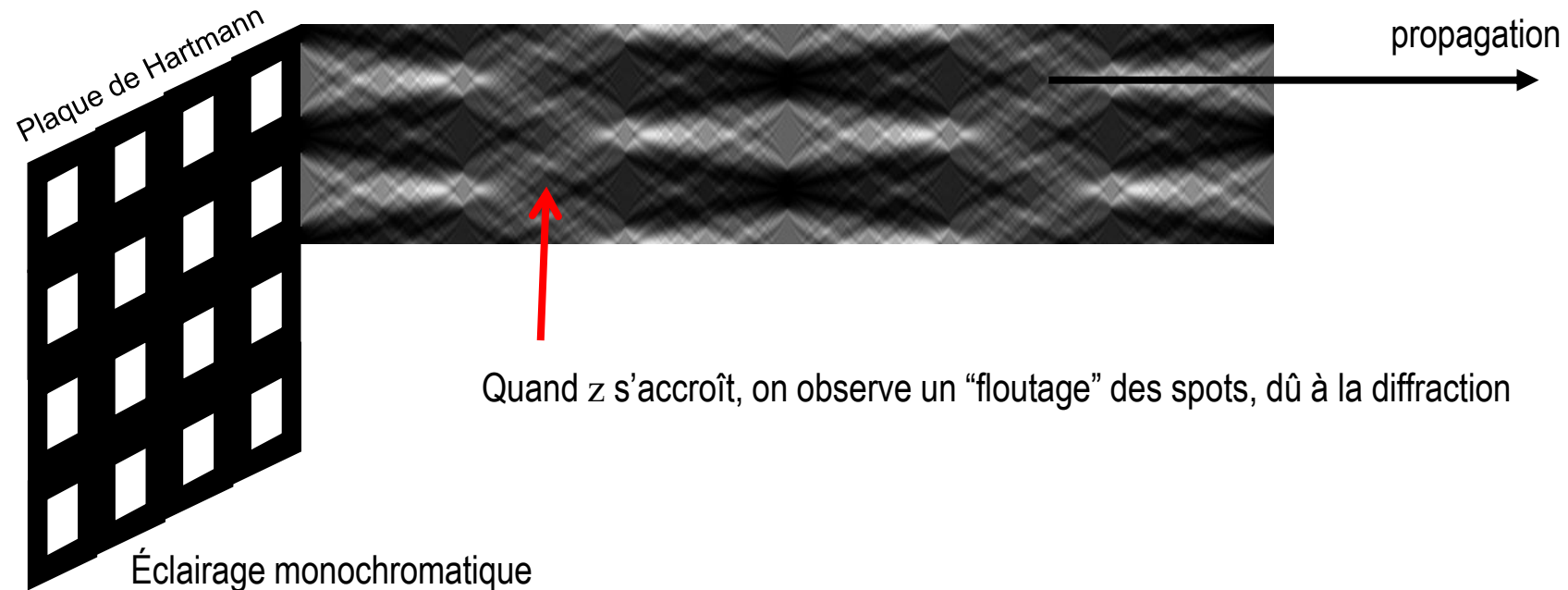


# Le Masque de Hartmann Modifié (MHM)

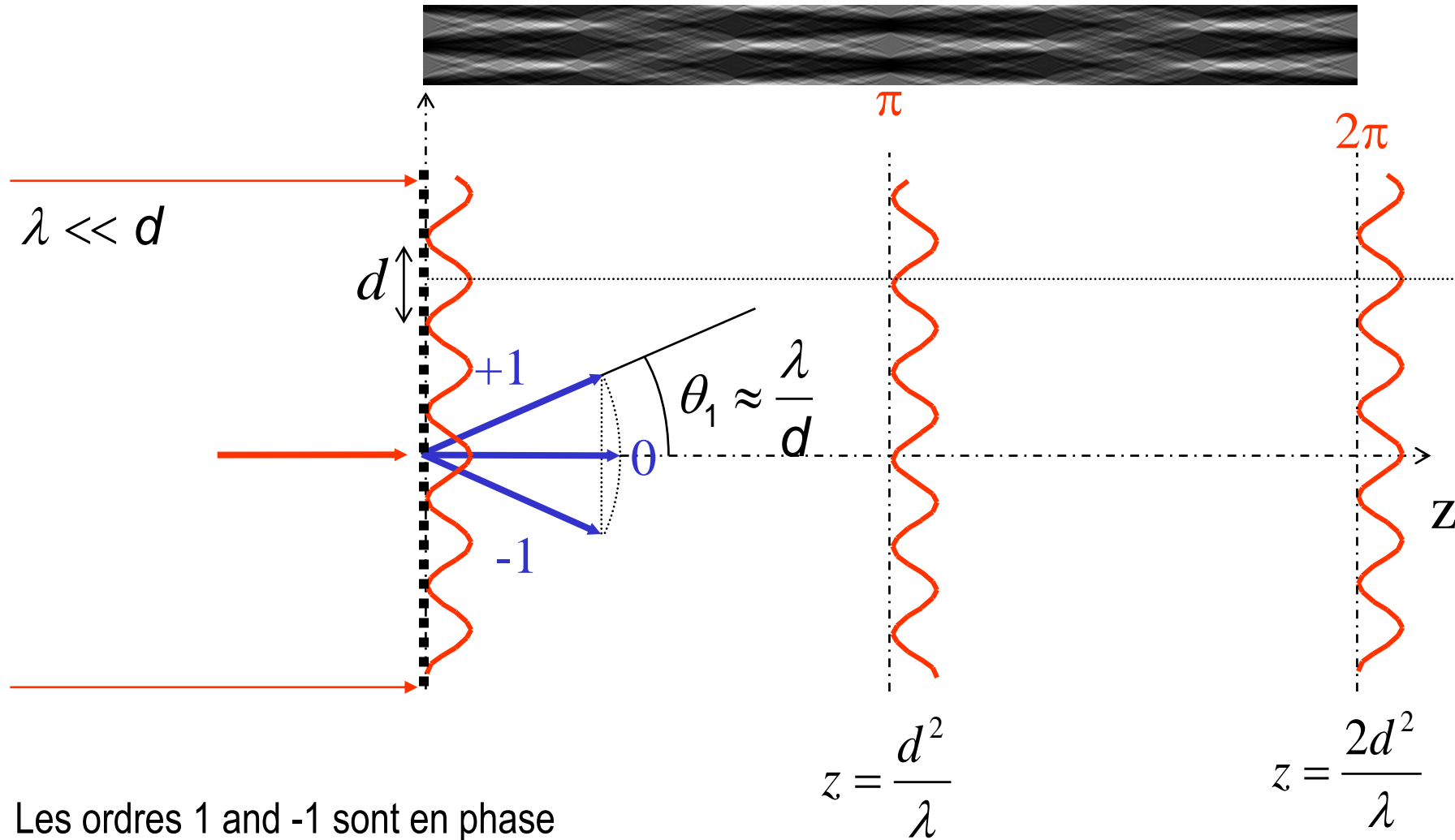
Le MHM est à considérer comme une évolution du Hartmann-Shack pour :

- récupérer la sensibilité continûment réglable
- augmenter le nombre de points de mesure (la résolution spatiale) à iso-détecteur

Le nouveau dispositif (donc la manière d'introduire la porteuse) est basé sur un objet optique original :  
*le tableau non-diffractant*



# L'effet Talbot (1836) : Explication avec un réseau sinusoïdal en intensité

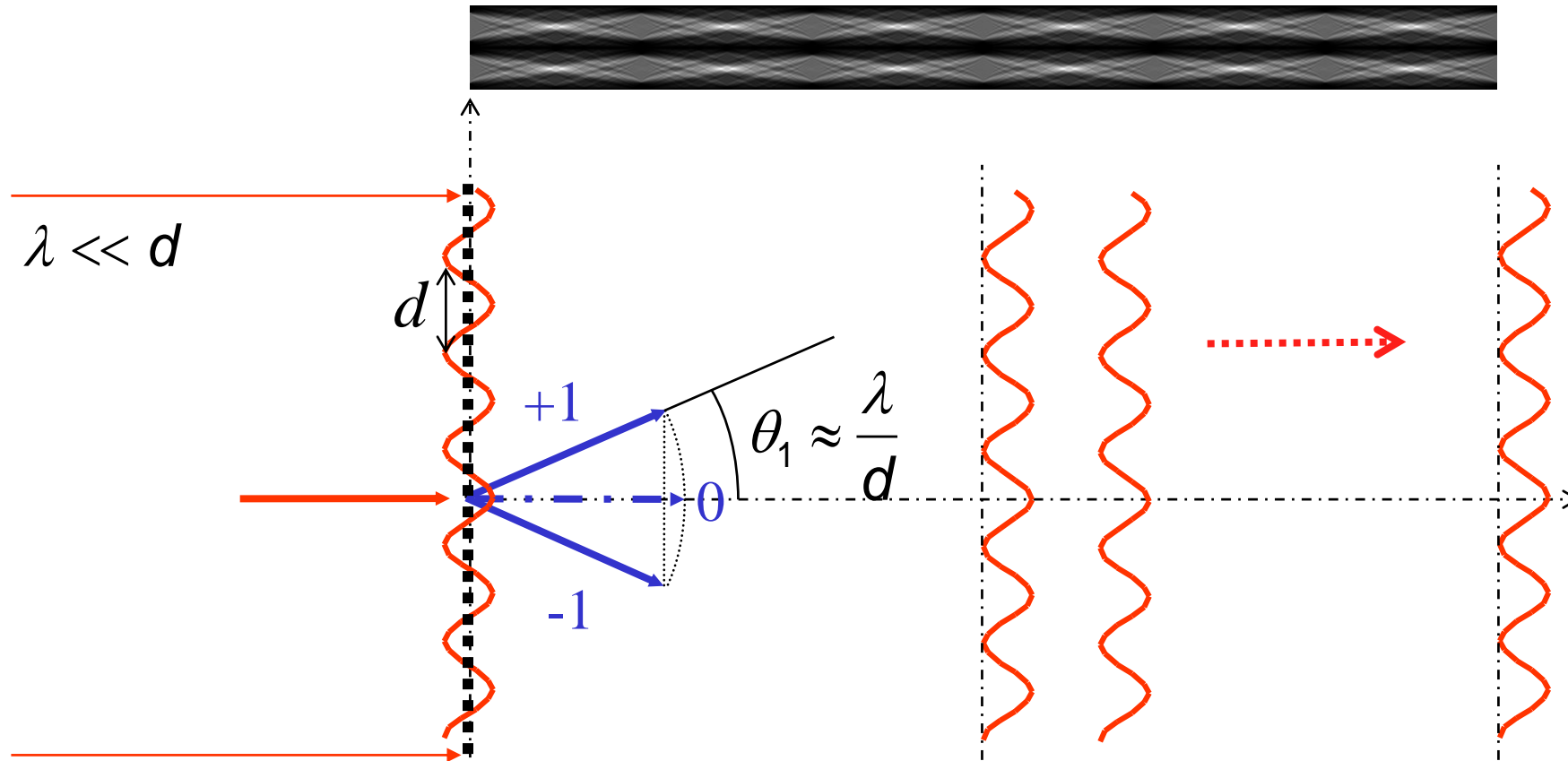


Les ordres 1 and -1 sont en phase

L'ordre 0 est plus "rapide" en propagation / z

Mais, périodiquement, le délai entre (1,-1) et 0 est égal à lambda

# L'effet Talbot (1836) : Explication avec un réseau sinusoïdal en amplitude



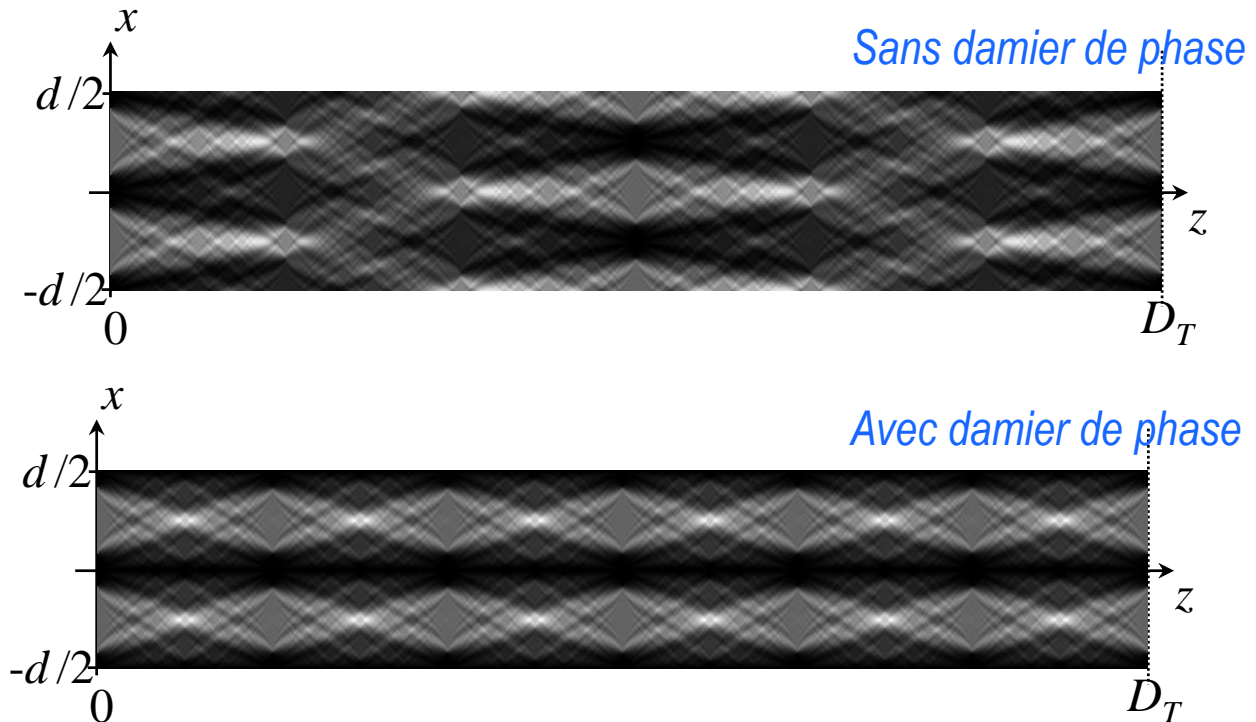
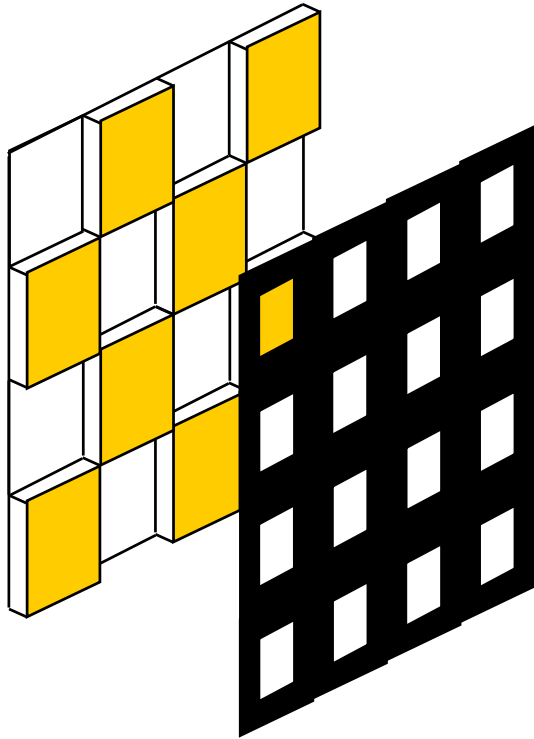
L'ordre 0 est supprimé

Les ordres 1 et -1 sont toujours en phase

Donc, le profil en intensité est invariant par propagation

# L'ajout du damier de phase

Le masque de Hartmann est donc complété par un damier de phase de période double et d'amplitude  $\lambda/2$  afin de passer d'une modulation en intensité à une modulation en amplitude

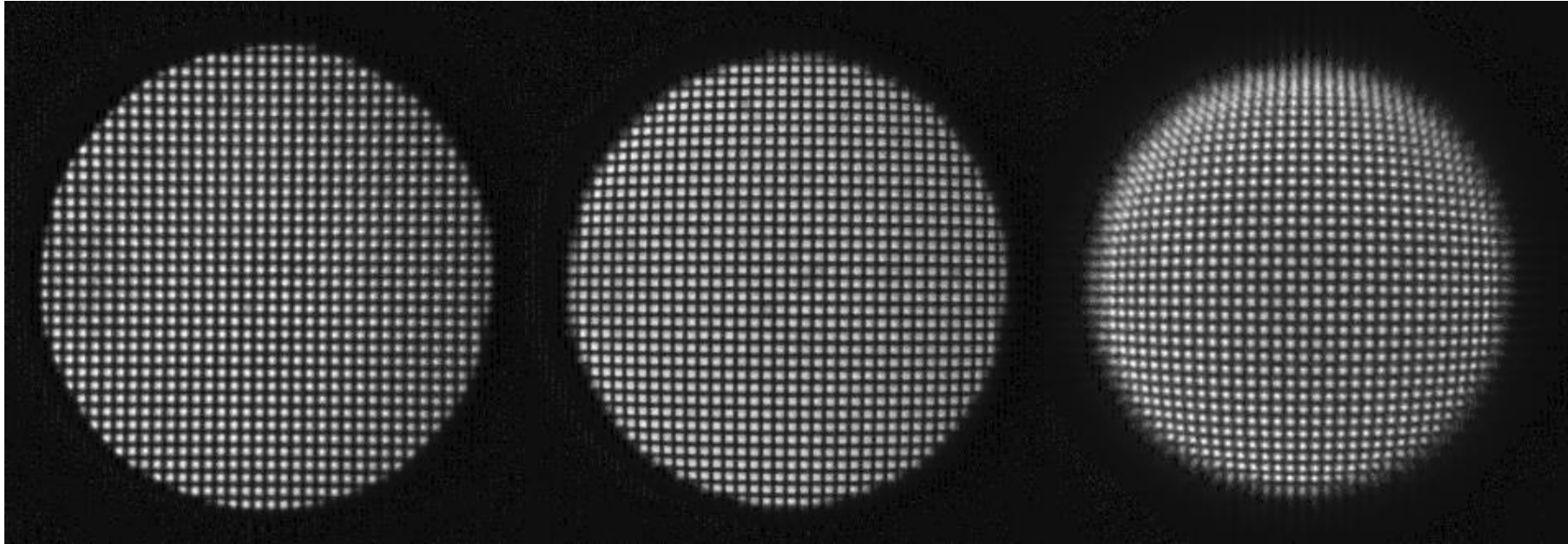


# *L'invariance par propagation*

---

Comme l'énergie est pseudo-guidée, le comportement est similaire au tracé de rayon.

→ les interférogrammes sont des “spot diagrams”



Interférogrammes à décalage quadri-latéral

# *Exemple de phases recouvrées*



# Masque de Hartmann Modifié : en résumé

---

Le MHM résulte d'une évolution du Hartmann, pour des applications métrologiques.

Il repose sur l'invariance par propagation grâce

**à l'introduction d'une porteuse insensible à la propagation**

Propriétés spécifiques :

- *les franges sont sinusoïdales dans les directions principales (Shannon)*
- *la sensibilité est continûment ajustable, au-delà des limitations du masque de Hartmann*

Un modèle géométrique didactique :

- *similaire au tracé de rayons, attention aux limites !*

Une modélisation interférométrique simple :

- *l'interférence de 4 répliques basculées du front d'onde incident*

Moins gourmand que le HS, plus que la Courbure :

- *typiquement 4 par 4 pixels par point de mesure (voire inférieur à 3 par 3)*

Fabricant :

- *Phasics (F) SID4 (parfois appelé interféromètre à décalage quadri-latéral)*

# Les propriétés de la TF sont à la base des algorithmes de recouvrement

Comment recouvrer  $\Phi$  à partir de la connaissance de  $\nabla^2\Phi$  ?

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}$$

Un moyen simple, à privilégier pour la plupart des applications, est de considérer la TF de la mesure

Dériver suivant  $x$  une fonction peut être fait dans l'espace de Fourier, en multipliant la TF de la fonction par  $2i\pi\nu$ , avec  $\nu$ , la coordonnée conjuguée de  $x$  dans l'espace de Fourier.

$$\Phi(x, y) \longrightarrow \frac{d\Phi(x, y)}{dx} \quad \gg \quad \tilde{\Phi}(\nu, \mu) \longrightarrow 2i\pi\nu \tilde{\Phi}(\nu, \mu)$$

$$\Phi(x, y) \longrightarrow \nabla^2\Phi(x, y) \quad \gg \quad \tilde{\Phi}(\nu, \mu) \longrightarrow -4\pi^2(\nu^2 + \mu^2) \tilde{\Phi}(\nu, \mu)$$



# Illustration avec le senseur de courbure

1 - TF de la courbure

2 - Division du résultat par :  $-4 \pi^2 (u^2 + v^2)$

3 - TF<sup>-1</sup>



# Analyse des interférogrammes : deux approches

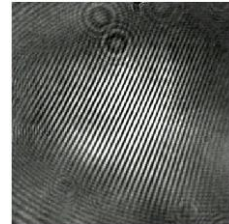
Le principe est le même : l'interférogramme (une distribution de franges (courbes ou points)) est démodulé pour obtenir les dérivées dans différentes directions.

En pratique, le traitement de signal est essentiellement indépendant du dispositif, même s'il faut prendre en compte des spécificités (support, ...)

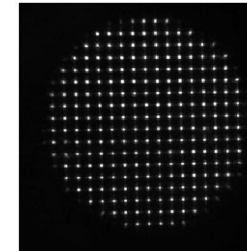
Il existe deux approches :

- **L'évaluation des coordonnées locales** de chaque franges:

- Pointé des franges pour les interférogrammes à deux ondes



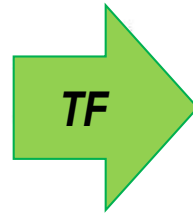
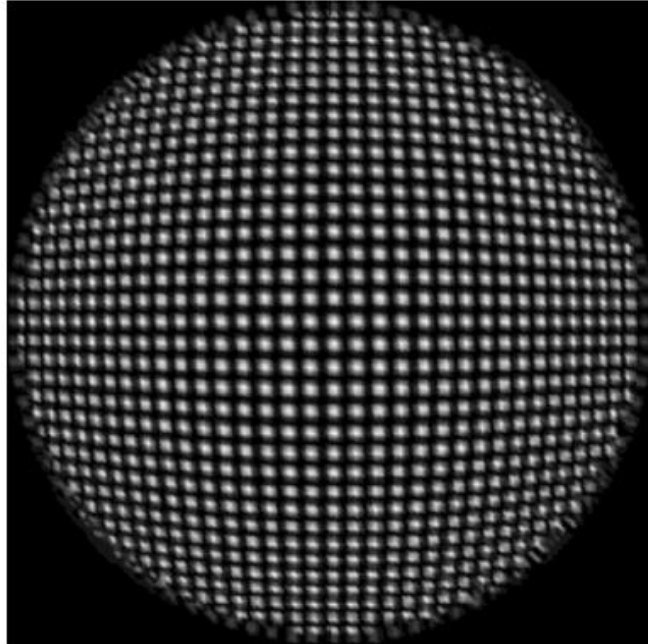
- Evaluation des barycentres des franges après une première étape de définition d'aires de recherche (c'est notamment le traitement classique du Hartmann-Shack)



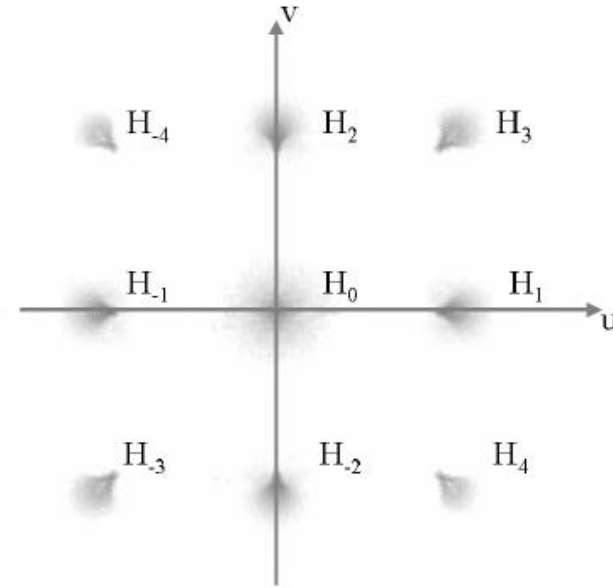
- **La démodulation globale** par Transformée de Fourier

# Analyse des interférogrammes : MHM (4 ondes)

Interférogramme à 4 ondes obtenu dans le cas d'une aberration sphérique



Valeur absolue de son spectre



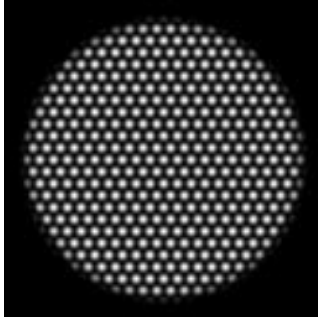
Les harmoniques correspondent à l'amplitude complexe qui aurait été observée au foyer d'une lentille placée devant la dérivée de la phase analysée:

On vérifie ici que la dérivée d'une aberration sphérique est une coma



# Analyse des interférogrammes : IDTL (3 ondes)

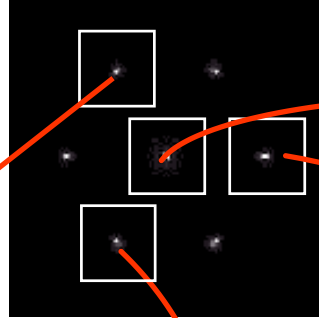
Interférogramme



Transformée de Fourier



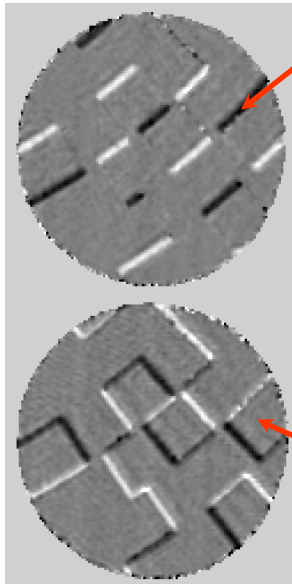
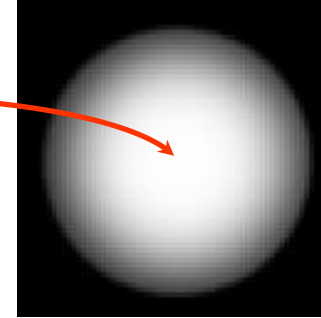
7 harmoniques



Transformée de Fourier inverse

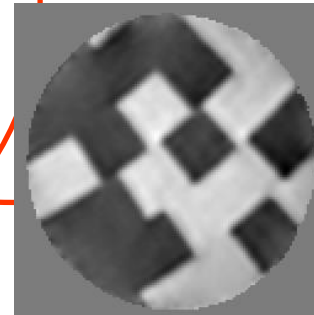


Détramage

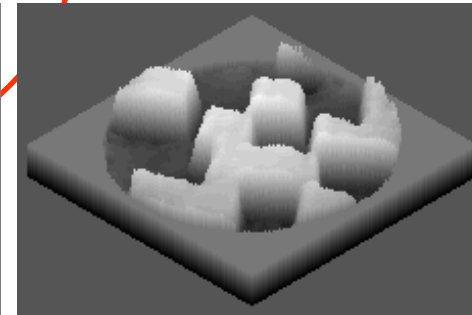


3 dérivées

Intégration

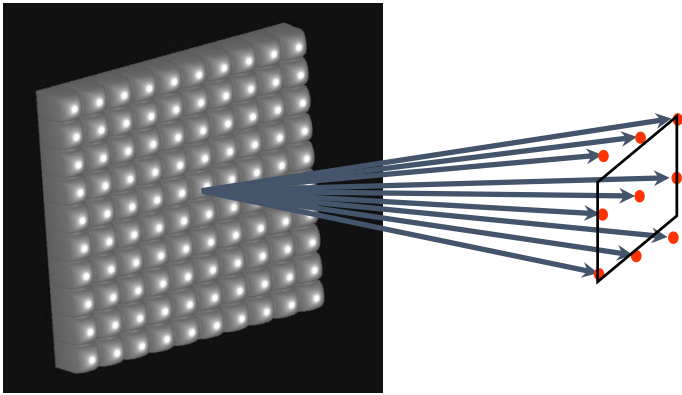


Phase recouvrée



# Le Hartmann-Shack également peut être analysé ainsi

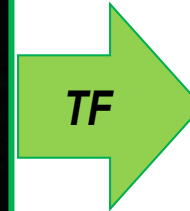
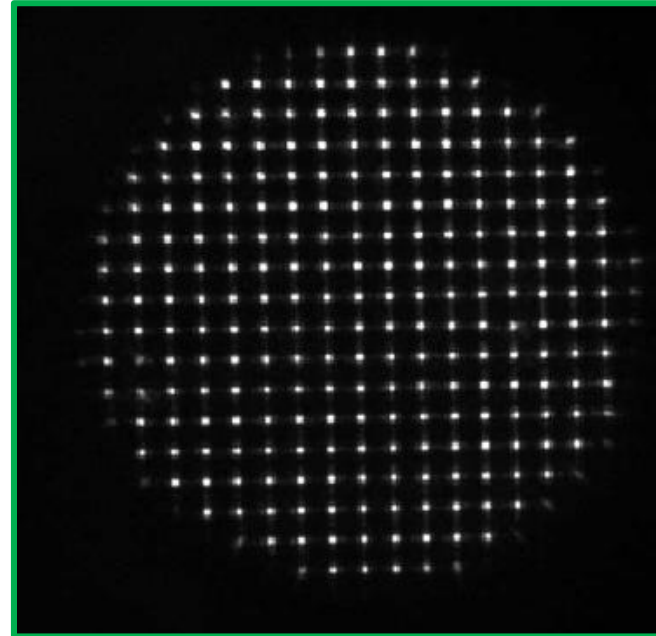
Le HS est un interféromètre à réseau



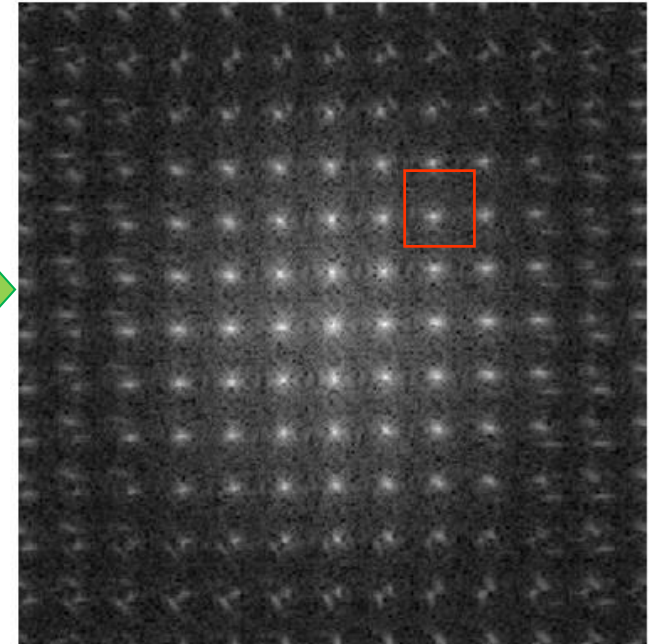
Grille de microlentilles  
→ réseau de phase bi-périodique

Il existe typiquement 20 par 20 répliques

Interférogramme à N ondes  
obtenu avec le Hartmann-Shack



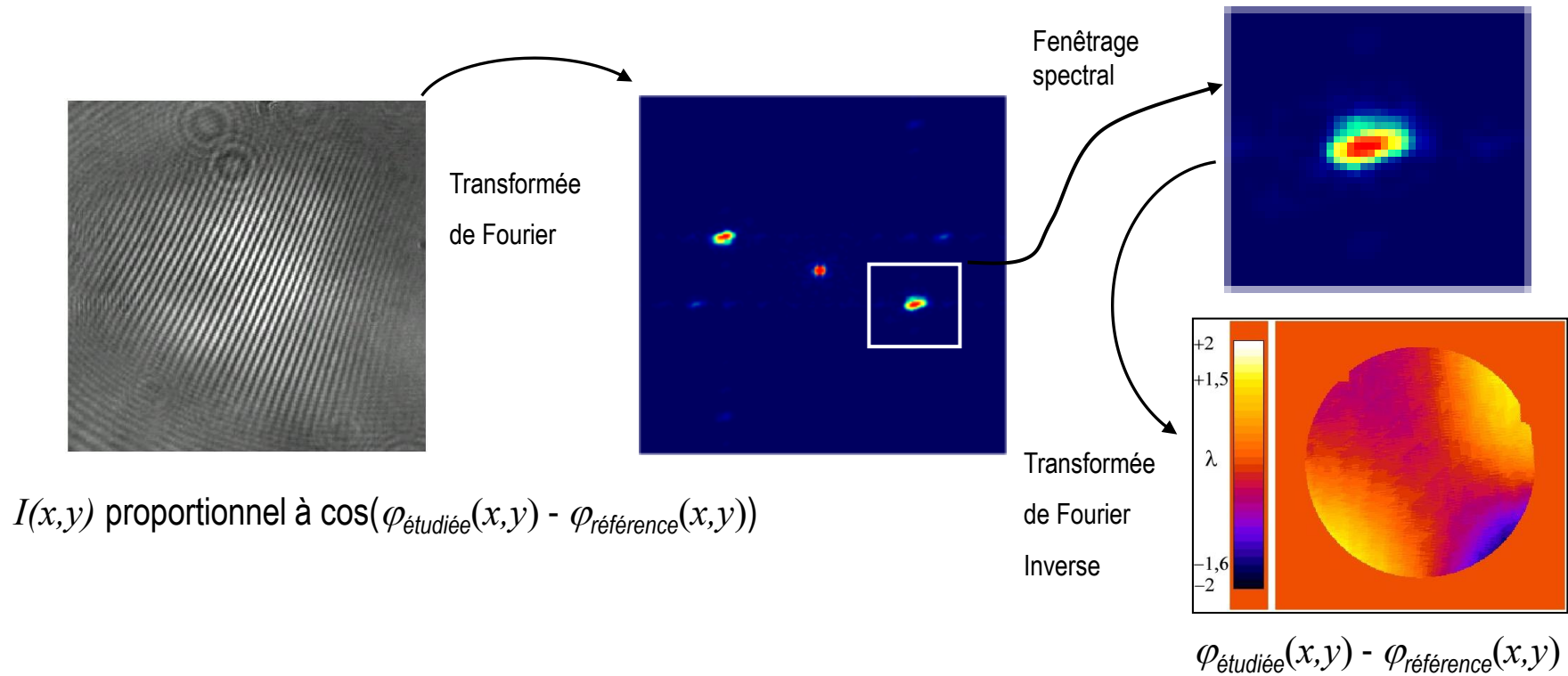
Fenêtrage d'une harmonique



Le HS présente un fort taux de compression (typiquement 16 par 16 pixels pour un spot élémentaire de 2 par 2 pixels)

- La taille de la **fenêtre** est petite devant le **support** de l'interférogramme
- Le nombre de points de mesure pour la dérivée en  $x$  est faible

# Analyse des interférogrammes : pour 2 ondes



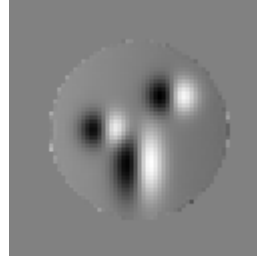
Si  $\varphi_{\text{référence}}(x,y) = ax + by,$   
 $= \varphi_{\text{étudiée}}(x-dx, y),$   
 $= \varphi_{\text{étudiée}}(r-dr),$

alors on recouvre la phase recherchée (cas précédent)  
 alors on recouvre la dérivée de la phase suivant l'axe  $Ox$ :  $d\varphi/dx$   
 alors on recouvre la dérivée radiale de la phase  $d\varphi/dr$

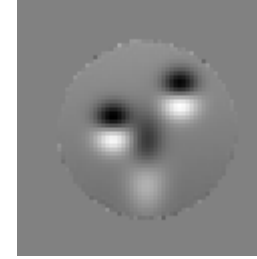
# Intégration par Transformée de Fourier

La plupart des senseurs donnent accès à deux dérivées partielles orthogonales.

$$\varphi'_x = \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x}$$



$$\varphi'_y = \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y}$$



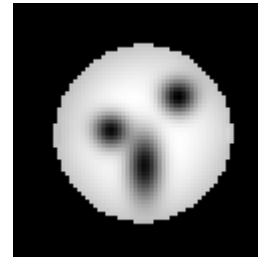
La technique d'intégration consiste à :

- 1- multiplier les TF des 2 gradients par  $2i\pi u$  (resp.  $2i\pi v$ ) (estimation de la dérivée seconde de  $F$  versus  $x$  ou  $y$ )
- 2- sommer les 2 résultats pour obtenir la courbure
- 3-, diviser par  $4\pi^2 (u^2 + v^2)$  pour obtenir la TF de la phase recherchée

$$\tilde{\varphi}(v, \mu) = \frac{(v\tilde{\varphi}'_x + \mu\tilde{\varphi}'_y)}{2i\pi(v^2 + \mu^2)}$$

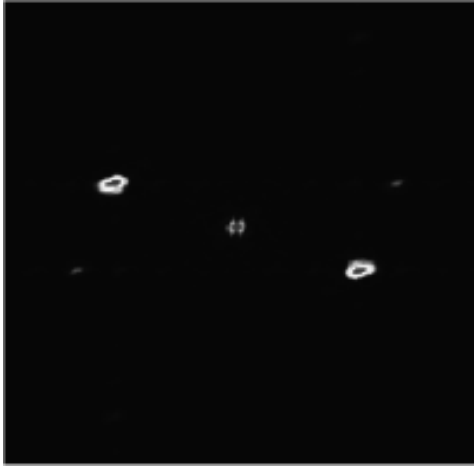
où  $(v, \mu)$  sont les coordonnées du vecteur  $\vec{v}$

Une dernière transformée de Fourier inverse permet alors d'obtenir la phase.

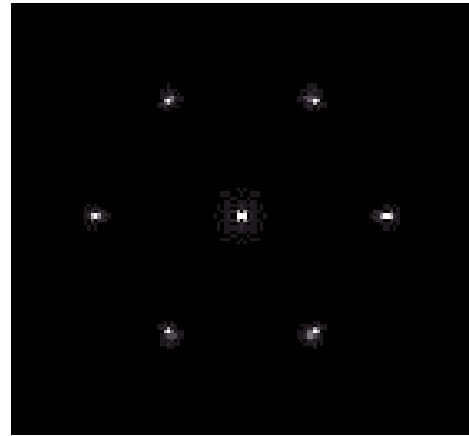


Remarque : L'étape 2 est en fait l'application directe des moindres carrés

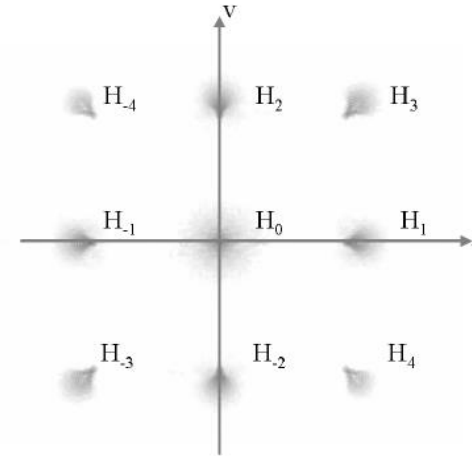
# Spectres des principaux Interféromètres à Décalage $N$ -Latéraux (IDNL)



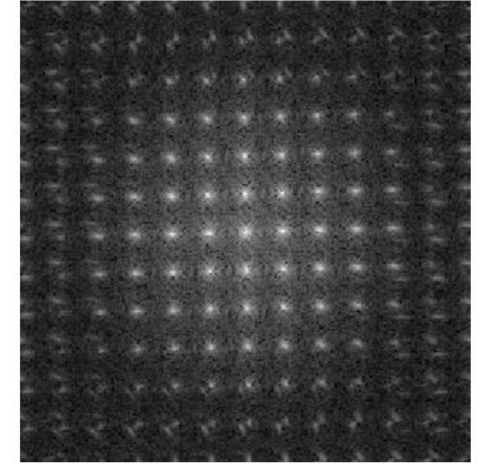
ID Bi-Latéral  
(Lame de shearing)



ID Tri-Latéral  
(IDTL)



ID Quadri-Latéral  
Masque de H. Modifié

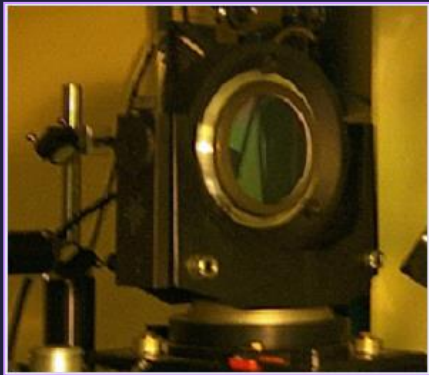


Hartmann-Schack

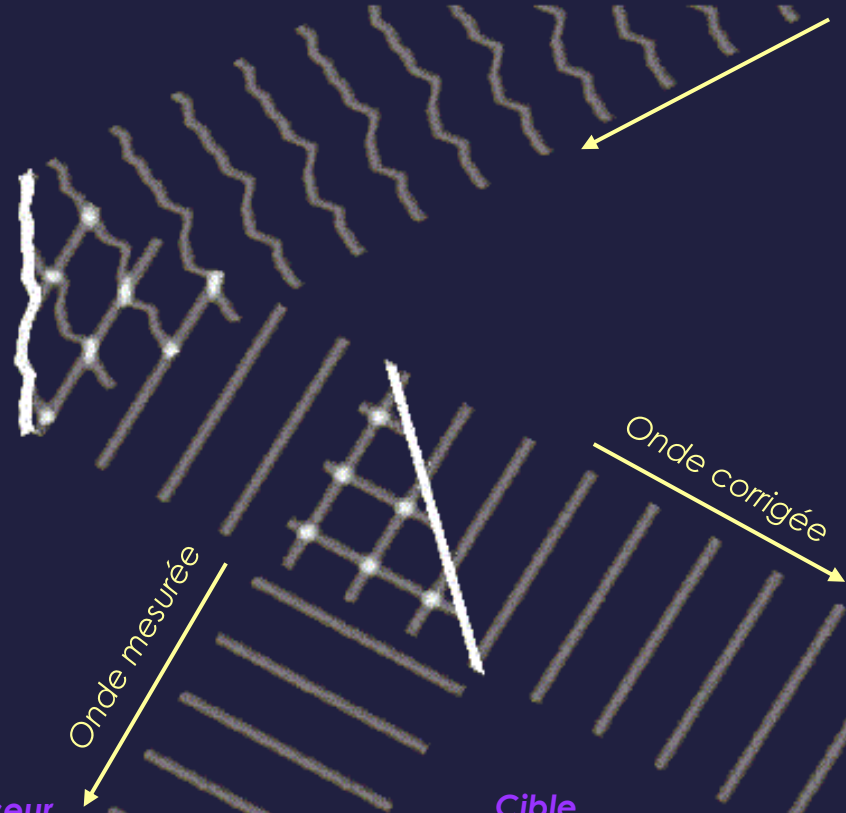
$N$  dérivées sont obtenues par sélection de  $N$  harmoniques dans différentes directions.  
Il en faut **au moins deux**.



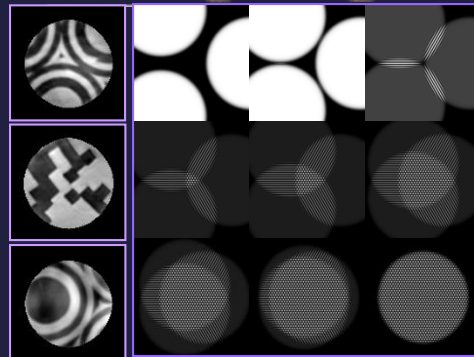
# Exemple d'application : Optique adaptative



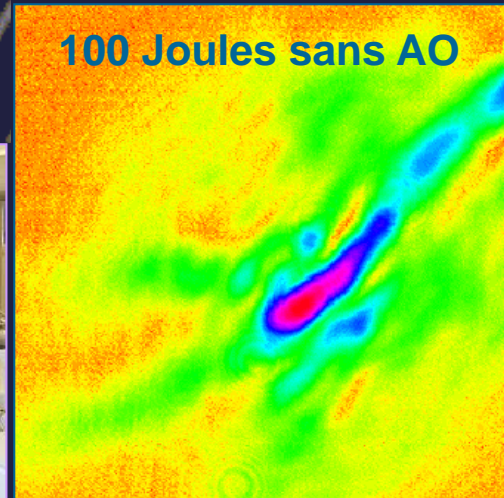
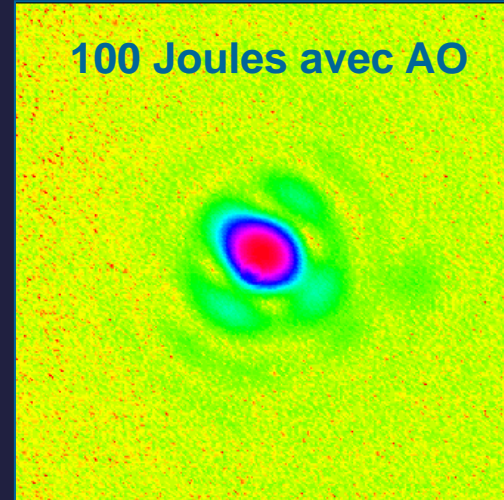
Miroir déformable



Senseur



Cible



---

Merci pour votre attention

# Annexe : Démonstration de l'ETI (1)

From the paraxial wave equation

$$\left( \nabla^2 + 2ik \frac{\partial}{\partial z} \right) u = 0, \quad (1)$$

where  $\nabla^2$  is the Laplacian operator  $\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$ , and  $u(r) = I^{1/2}(r) \exp(i\varphi(r))$ . Multiplying the left side of equation (1) by  $u^*(r)$  we obtain

$$2iku^* \frac{\partial}{\partial z} u + u^* \nabla^2 u = 0, \quad (2)$$

Now taking the conjugate of equation (1) and multiplying the left side by  $u(r)$  we obtain

$$-2iku \frac{\partial}{\partial z} u^* + u \nabla^2 u^* = 0. \quad (3)$$

Subtracting equation (3) from (2) gives

$$2ik \left( u^* \frac{\partial}{\partial z} u + u \frac{\partial}{\partial z} u^* \right) + u^* \nabla^2 u - u \nabla^2 u^* = 0. \quad (4)$$

Equation (4) may be simplified as follows

$$2ik \frac{\partial}{\partial z} (uu^*) + u^* \nabla^2 u - u \nabla^2 u^* = 0. \quad (5)$$

Since  $uu^* = I$  we have

# Annexe : Démonstration de l'ETI (2)

Since  $uu^* = I$  we have

$$2ik \frac{\partial}{\partial z}(I) + u^* \nabla^2 u - u \nabla^2 u^* = 0. \quad (6)$$

To simplify the last equation we make use of the vector identity

$$u^* \nabla^2 u - u \nabla^2 u^* = \nabla \cdot (u^* \nabla u - u \nabla u^*), \quad (7)$$

thus equation (6) becomes

$$2ik \frac{\partial}{\partial z}(I) + \nabla \cdot \mathbf{S} = 0, \quad (8)$$

where  $\mathbf{S} = u^* \nabla u - u \nabla u^*$ . Since  $u(r) = I^{1/2}(r) \exp(i\varphi(r))$  one obtains  $u^* \nabla u - u \nabla u^* = 2iI\nabla\varphi$  and thus equation (8) becomes, after simplification,

$$k \frac{\partial}{\partial z}(I) + \nabla \cdot (I\nabla\varphi) = 0. \quad (9)$$

# Session 1: Les fondamentaux

*Chairman : Jérôme Primot*

- *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes. Jean-Christophe Chanteloup, LULI*
- *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope. **Serge Monneret**, Institut Fresnel*
- *PISTIL, Cindy Bellanger, ONERA*
- *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X. **Adrien Stolidi**, CEA*



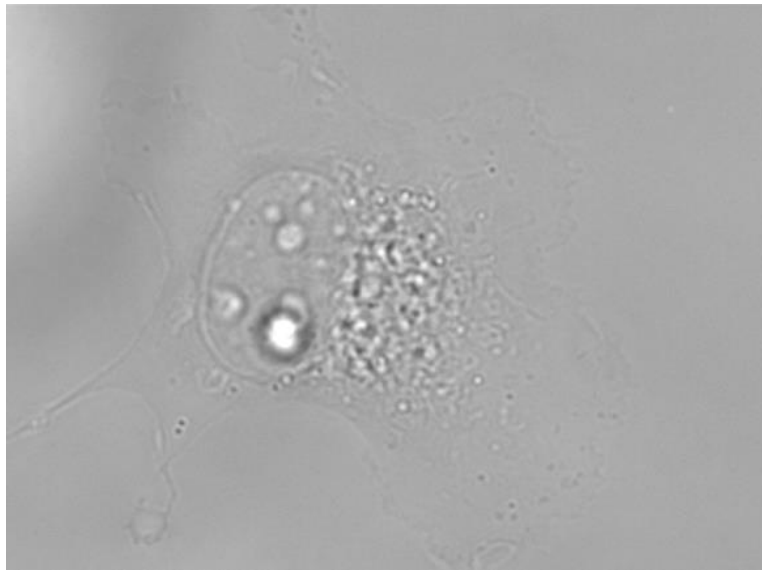
# De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope

Serge Monneret (et beaucoup d'autres à Fresnel sur 2007-2023 !)

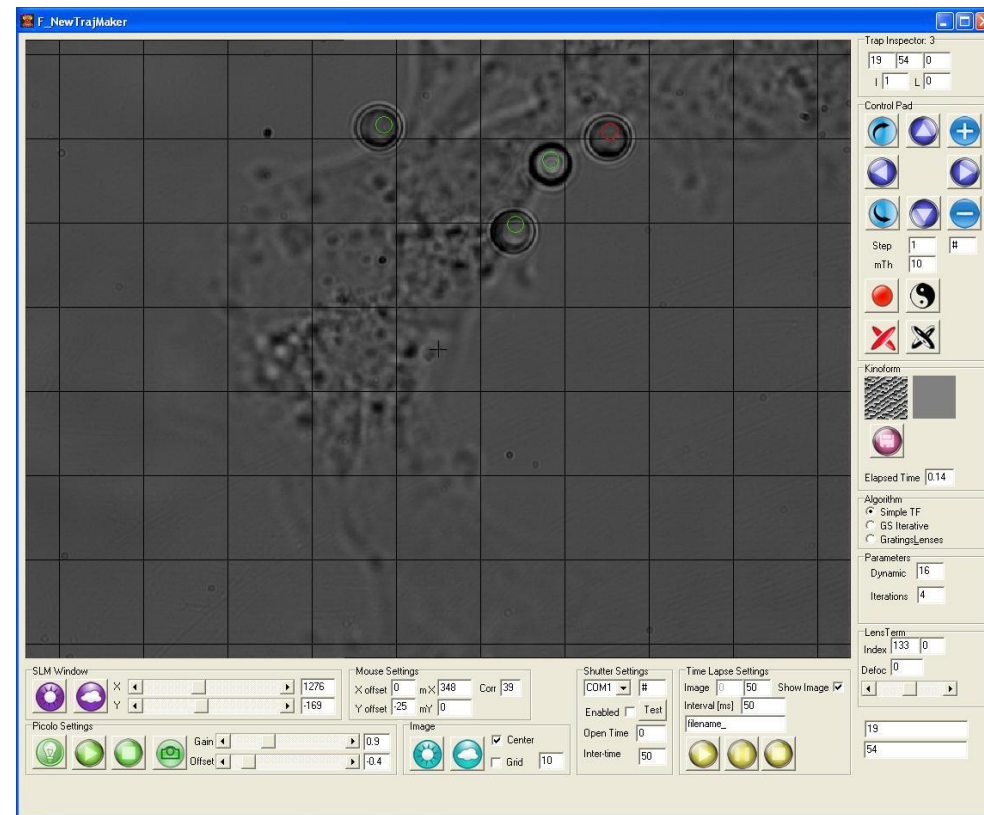
Benoit Wattellier (et pas mal d'autres chez Phasics sur 2007-2023 !)

# Contexte initial : dynamique des membranes cellulaires

2007 : travail sur les membranes de cellules COS7, collab. Didier Marguet, CIML

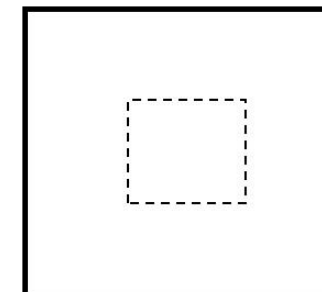
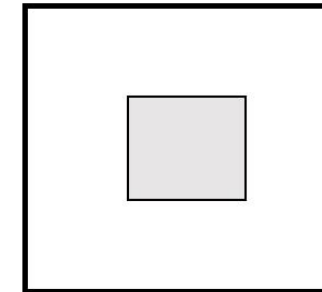
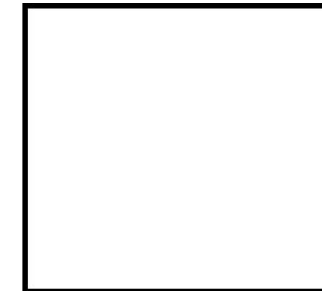
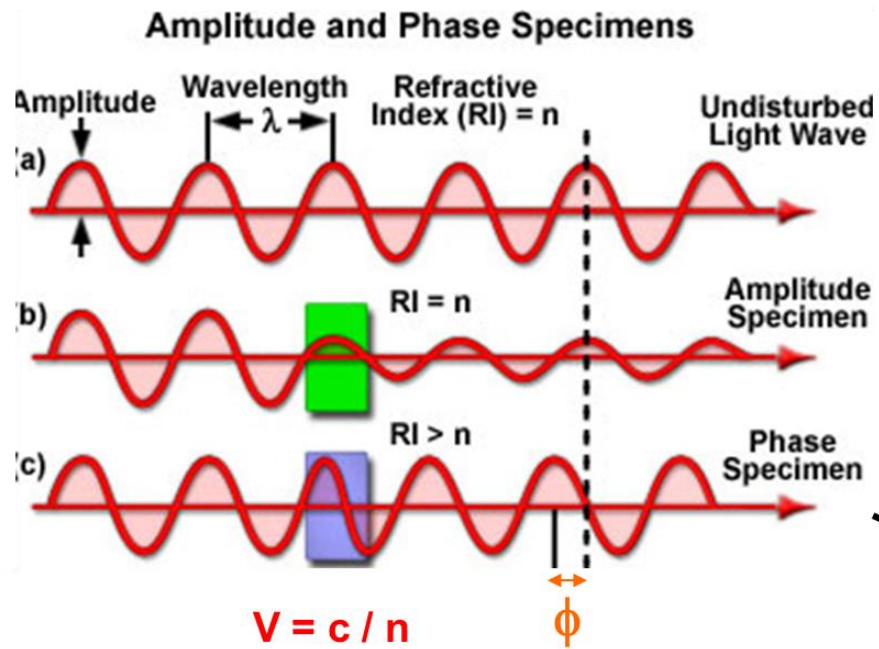


*COS-7 cell, intensity visualisation  
(NA=1.3)*



# Imagerie par contraste de phase

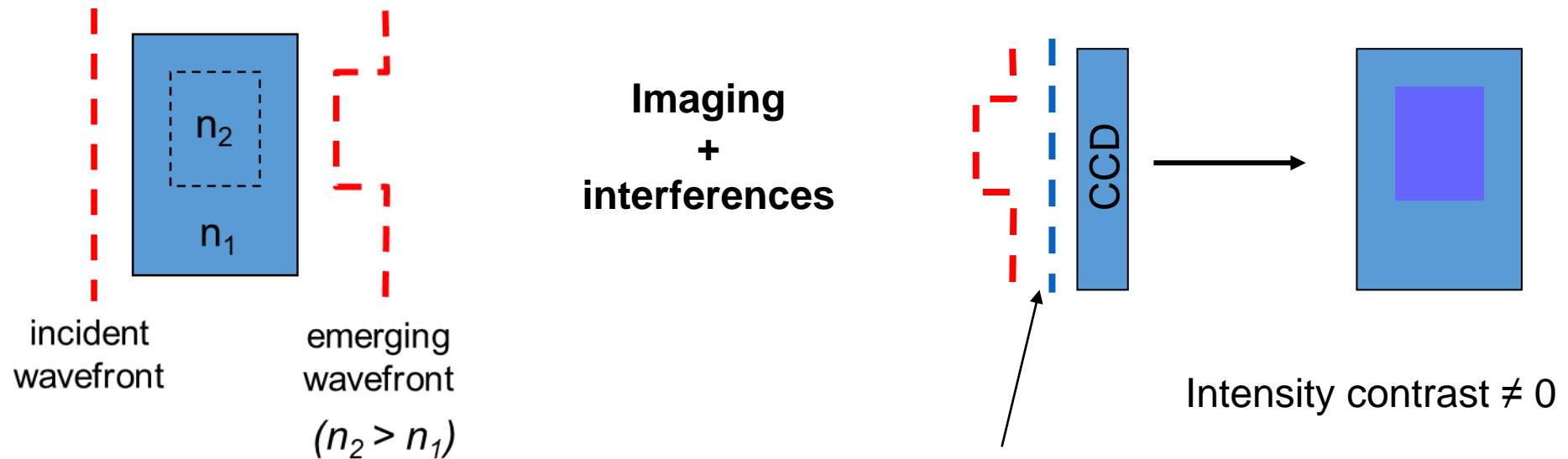
Une solution : utiliser le déphasage des ondes lumineuses à la traversée de milieux transparents = « imagerie de phase »





# Imagerie par contraste de phase

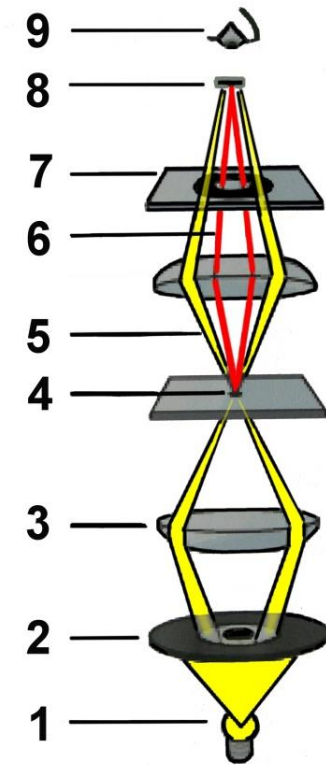
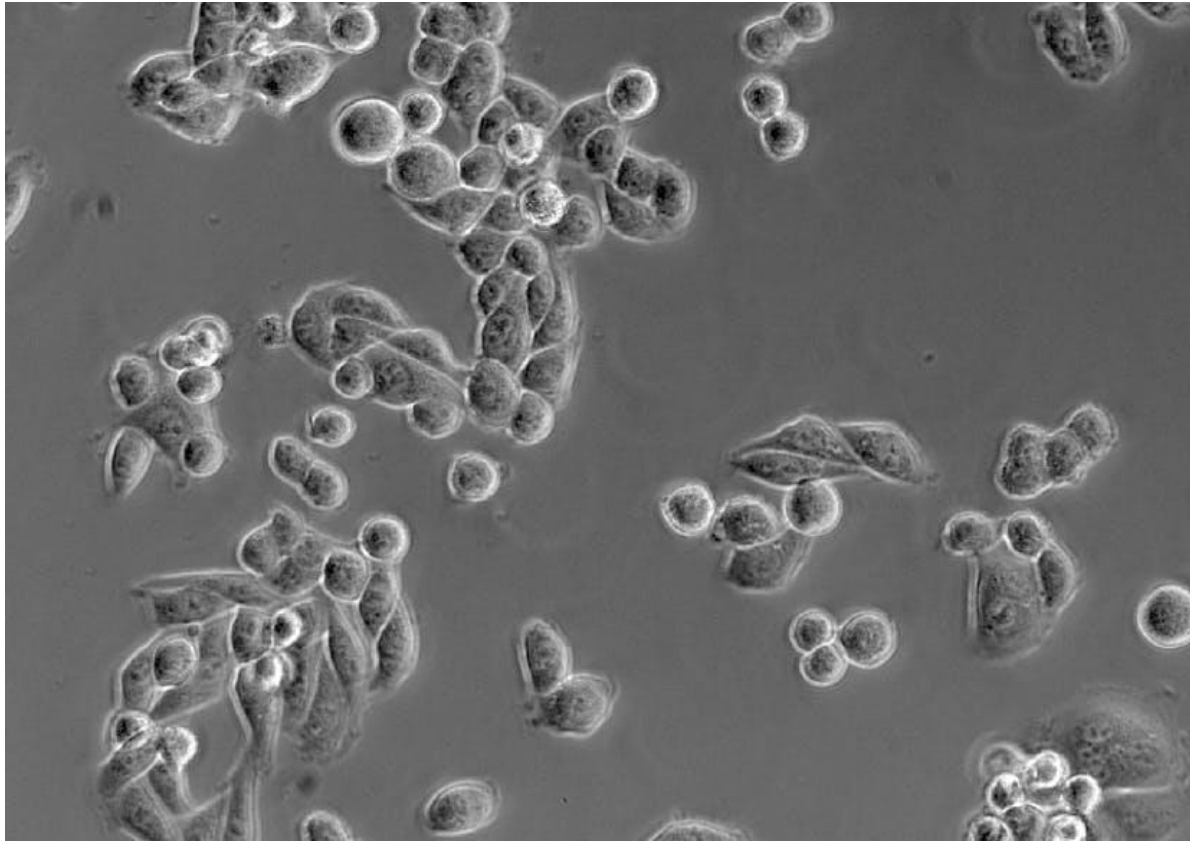
Génération de contraste à partir de l'information de phase



Needs a second optical beam  
to be present inside the microscope

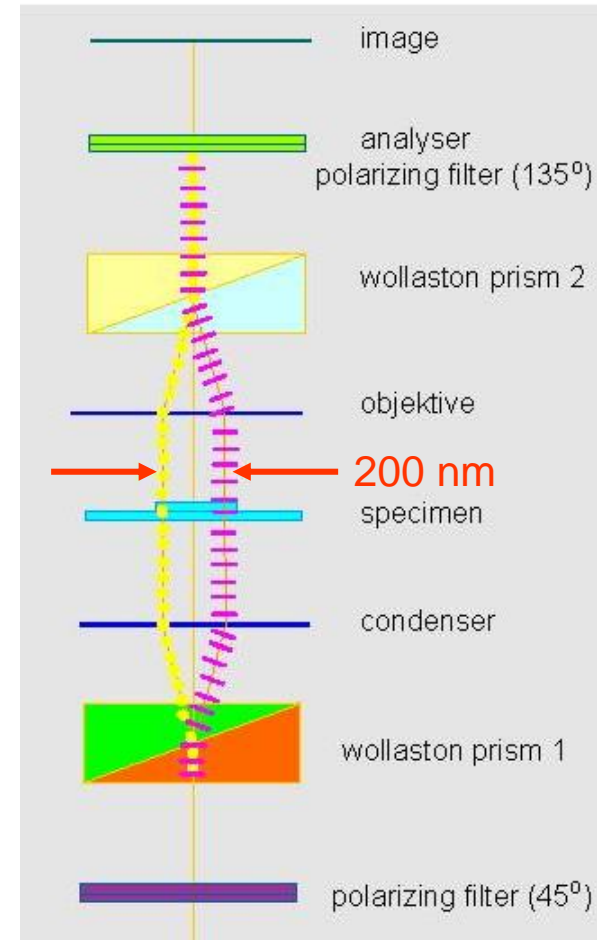
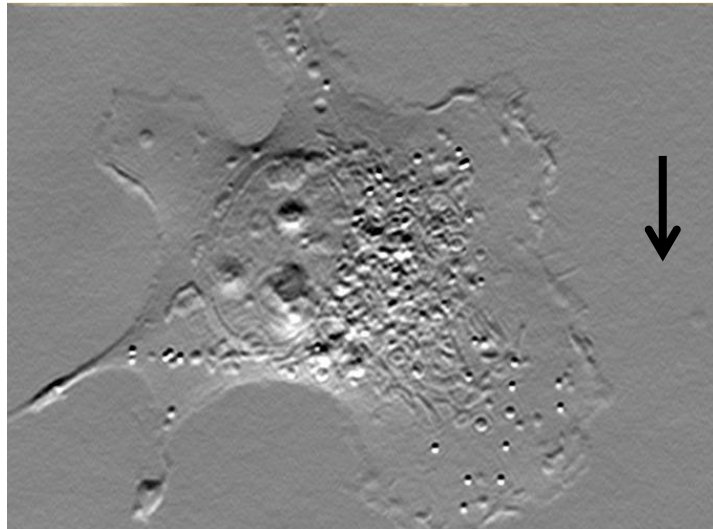
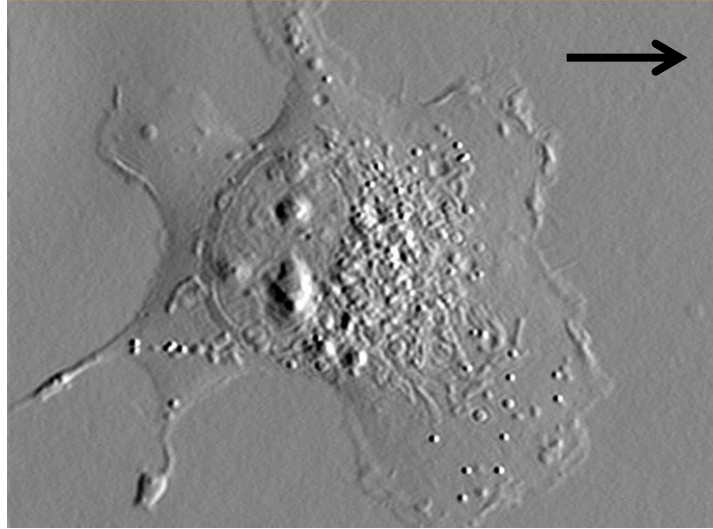
# Imagerie par contraste de phase

Contraste de phase de Zernike – 1935 (Nobel 1953)



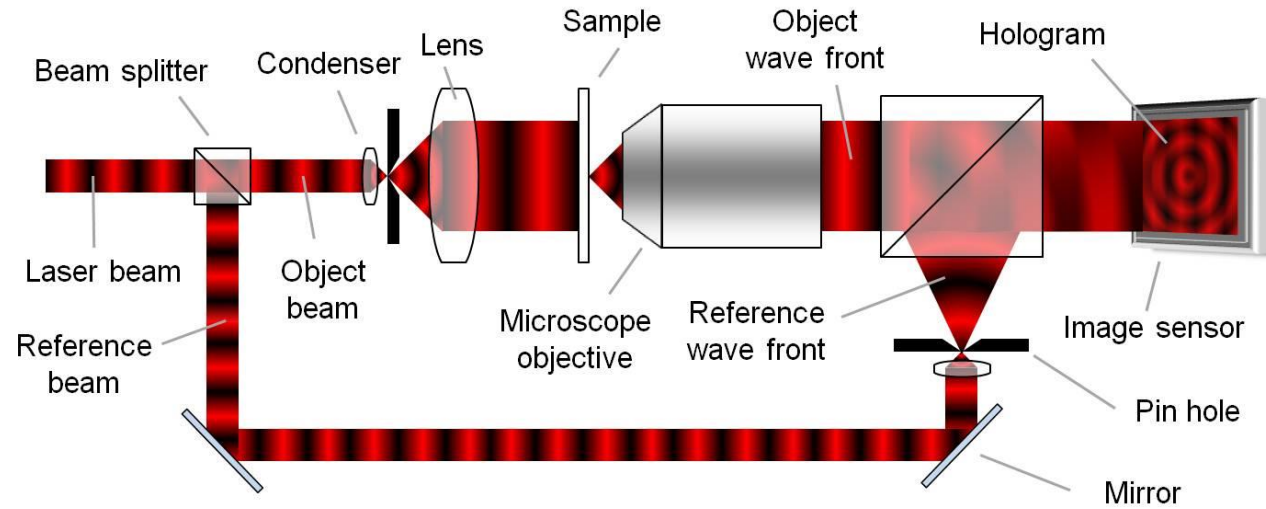
# Imagerie par contraste de phase

## Microscope à contraste interférentiel différentiel (DIC / Nomarski) – 1955



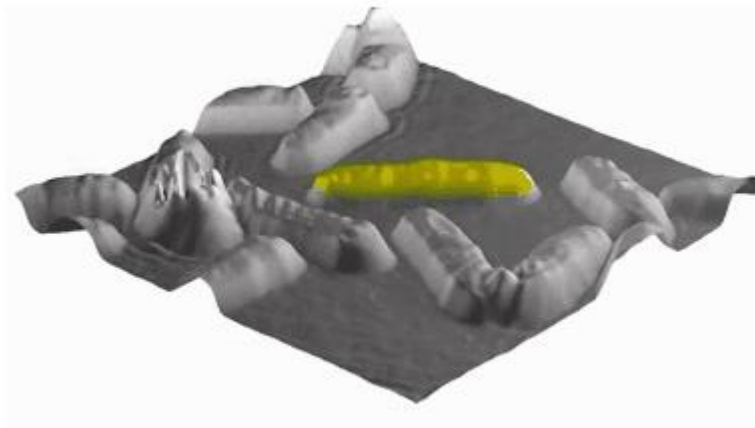
# Imagerie par contraste de phase

Digital Holographic Microscopy (DHM) – 1999 (EPFL, groupe de C. Depeursinge)



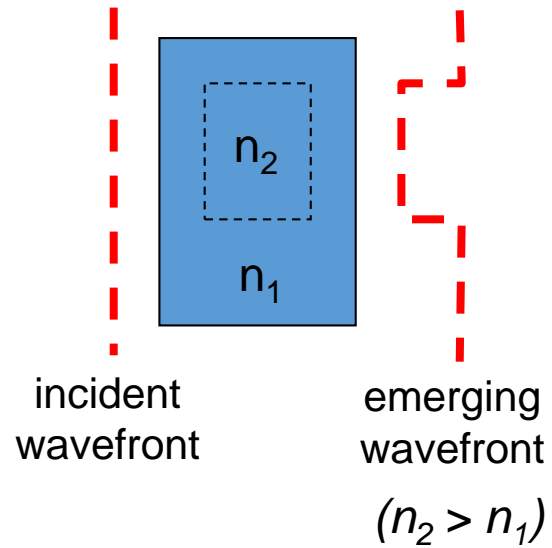
From Wikipedia

 lyncée tec

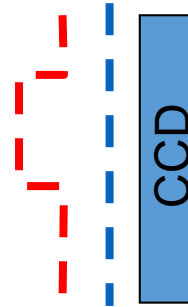


# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

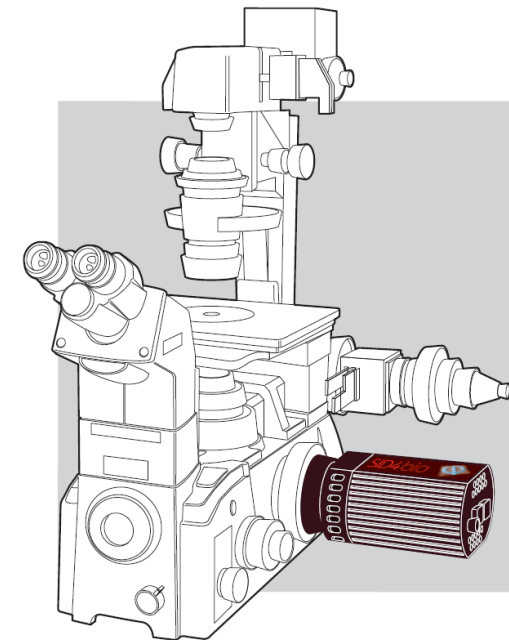
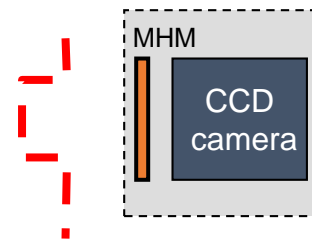
L'analyse directe du front d'onde comme alternative



Imaging  
+  
interferences

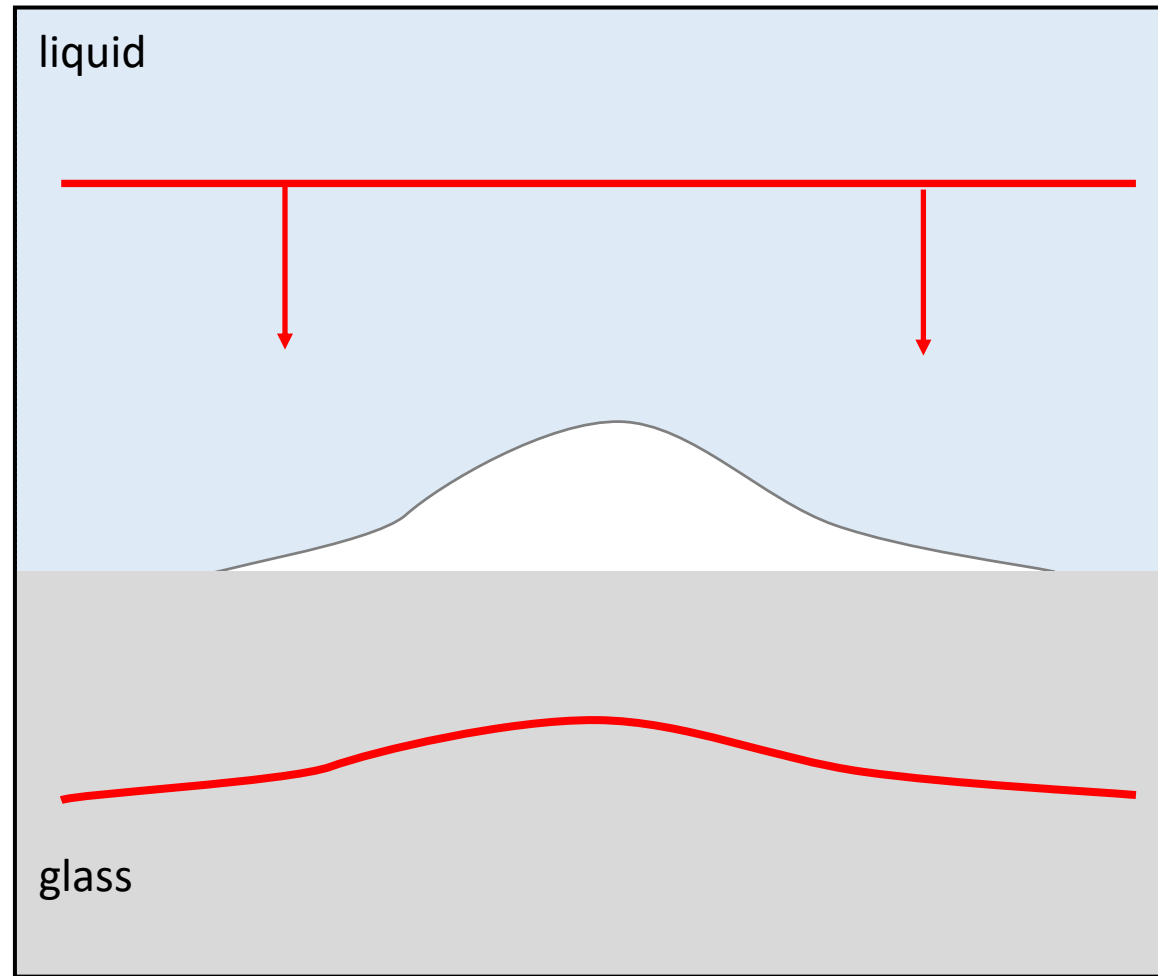


Imaging  
+  
Direct sensing



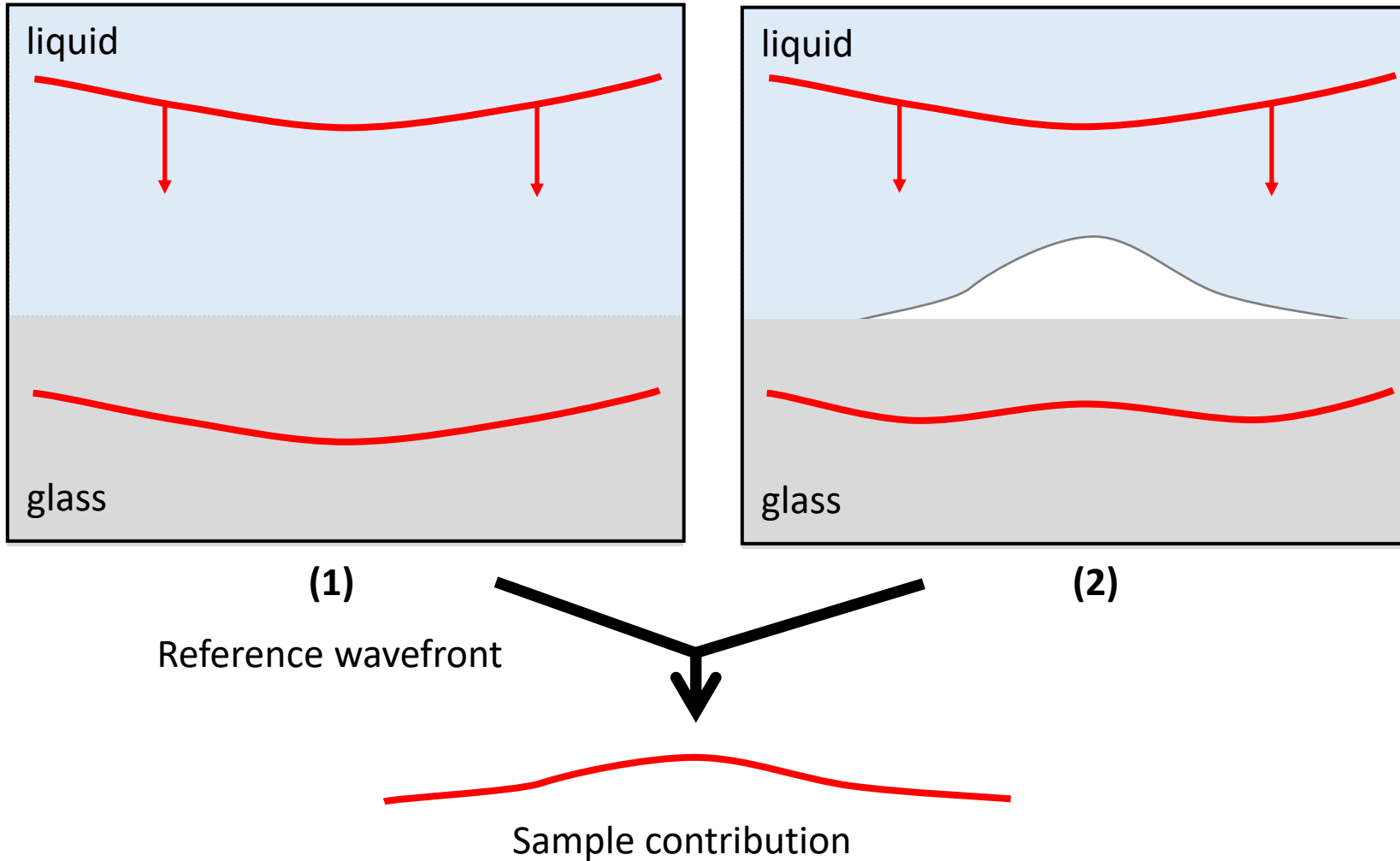
# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

## Principe



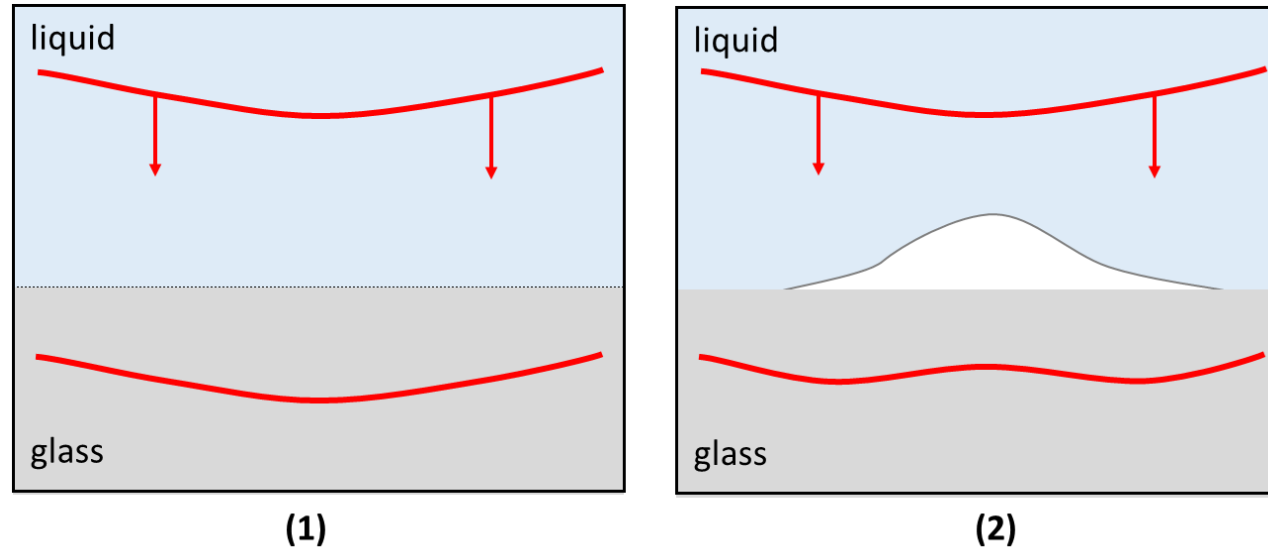
# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

En réalité : mesure différentielle



# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

Les « images de phase » sont en réalité des cartes d'OPD  
(différence de chemin optique)

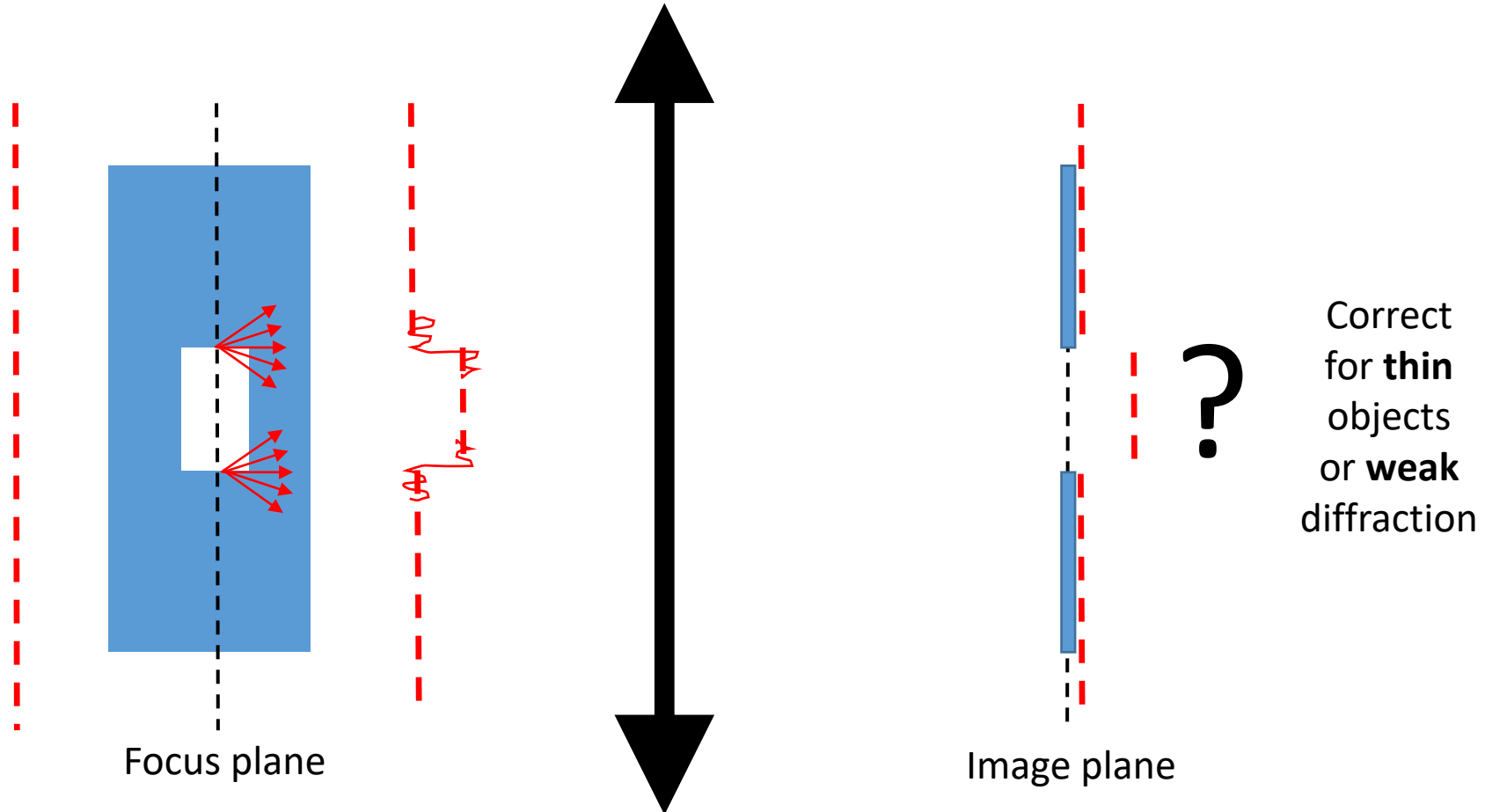


$$OPD_{proj}(x, y) = \int (n(x, y) - n_{milieu}) \cdot dz$$



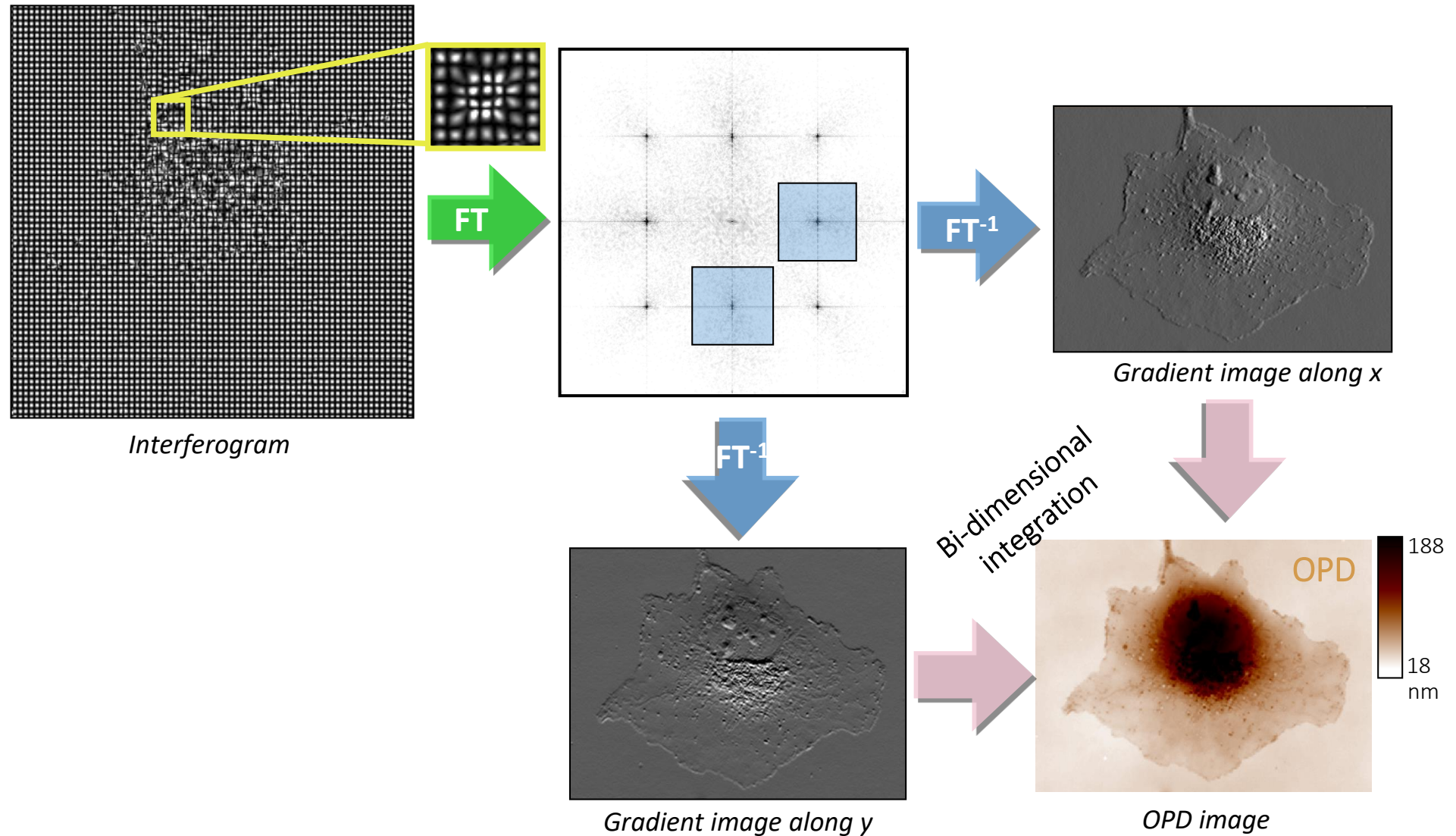
# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

Conditions de fonctionnement / hypothèses à respecter



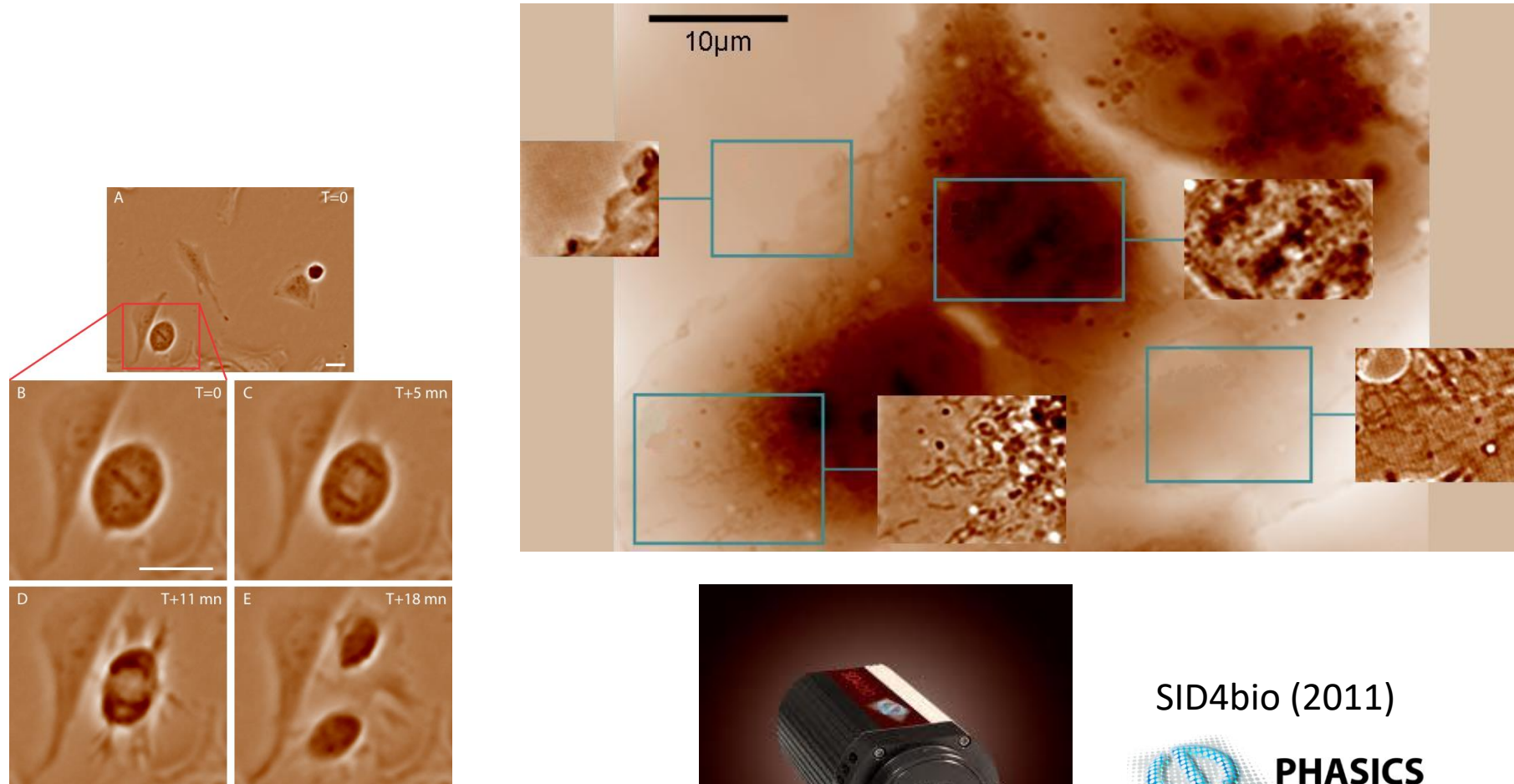
# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

## Traitement numérique des interférogrammes



# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

## Utilisation de cartes d'OPD pour l'imagerie de cellules vivantes

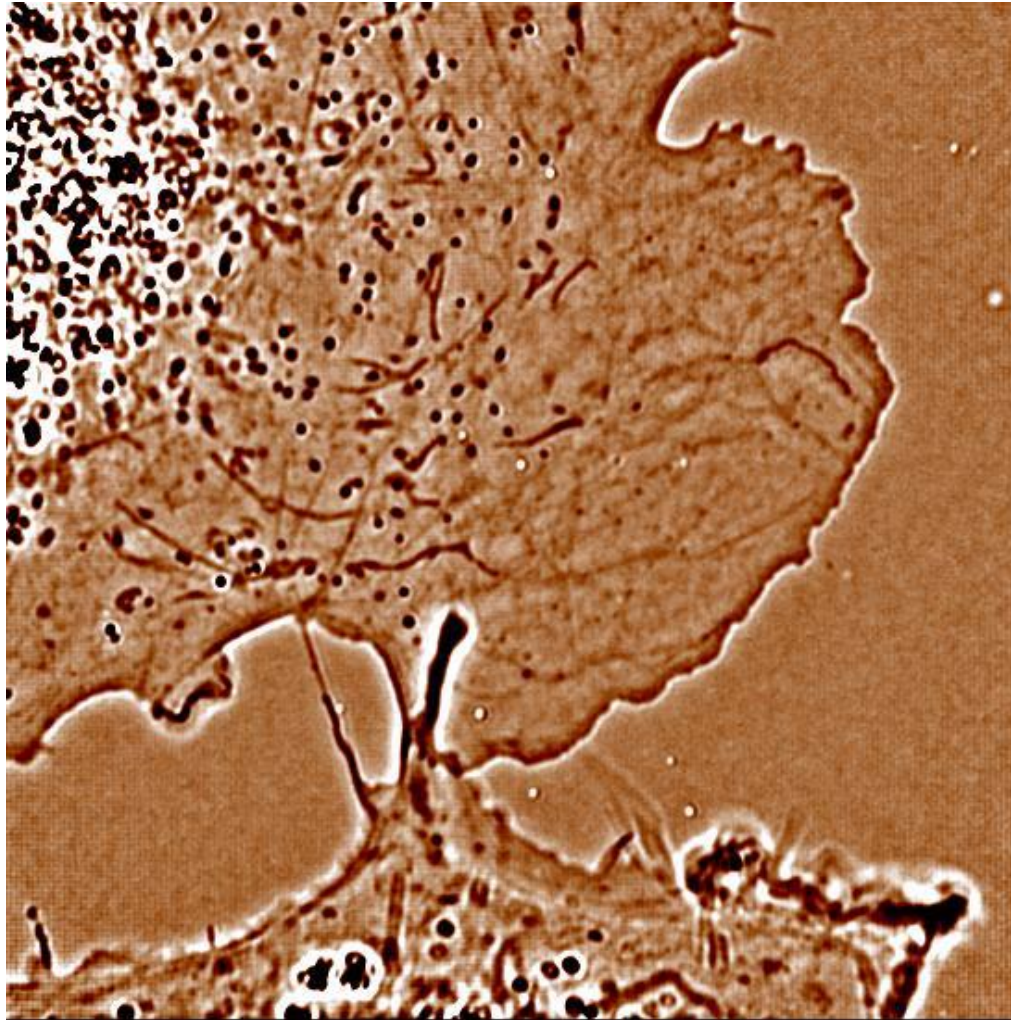


SID4bio (2011)



# Imagerie de phase par analyse de front d'onde

Imagerie à haute résolution en OPD :



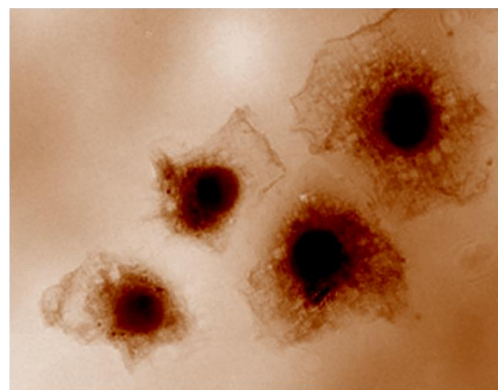
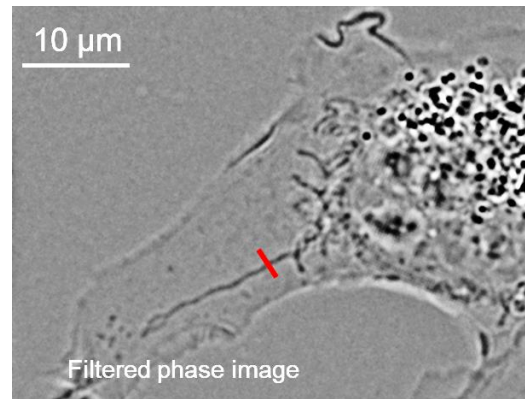
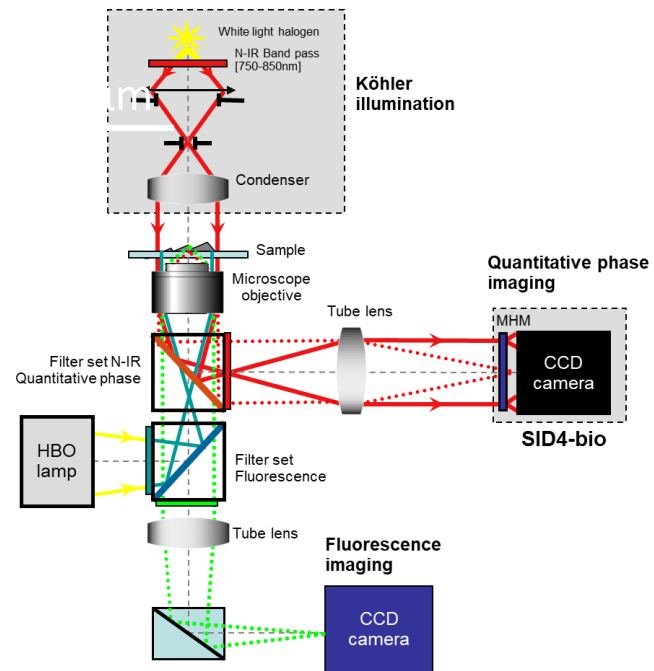
**Special kHz wavefront sensor**

**0.2 nm sensitivity (OPD)**

**High-pass filtering**

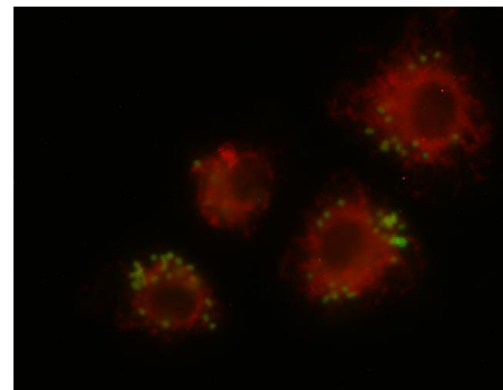
# Imagerie "de phase" par analyse de front d'onde

## Imagerie simultanée phase / fluorescence



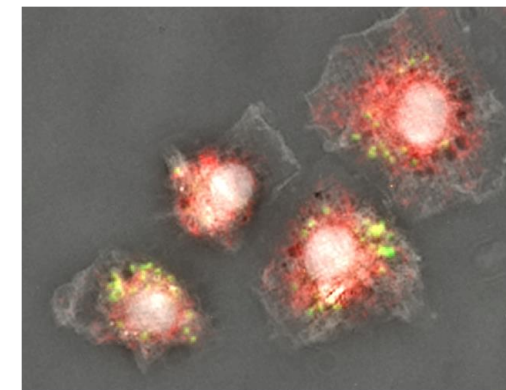
Phase shift

+



Fluorescence; green=bacteria, red=endosomes

=

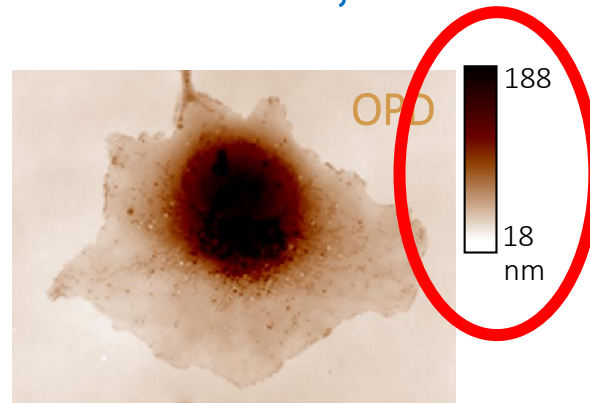


Composite image

*Fixed COS7 cells  
X40; NA=0.95*

# Imagerie quantitative de phase

L'ID4L permet de MESURER des fronts d'onde, et donc des OPD



Et de nombreux cas se rapportent à des objets de phase :

Objets transparents

Distributions d'indice  $n = f(x,y,z,t)$

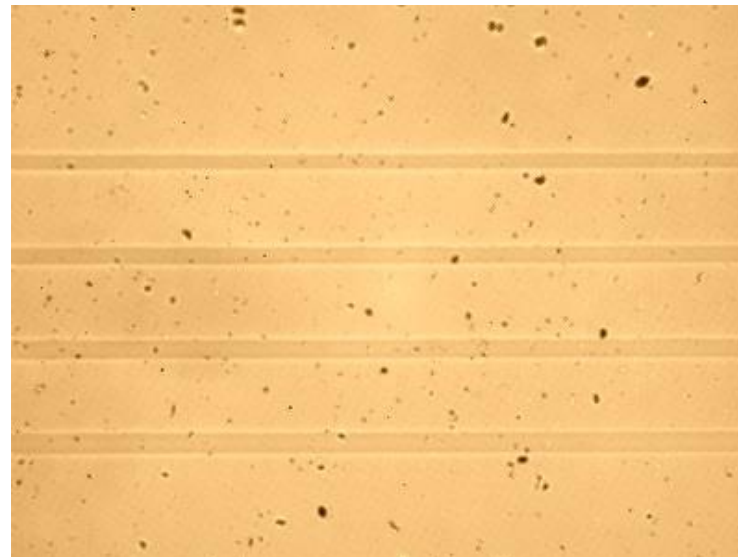
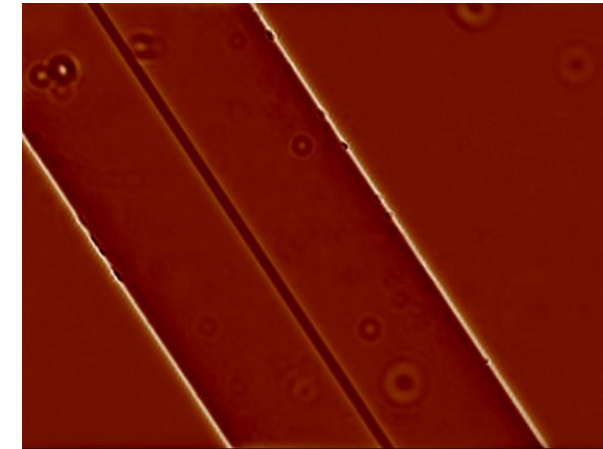
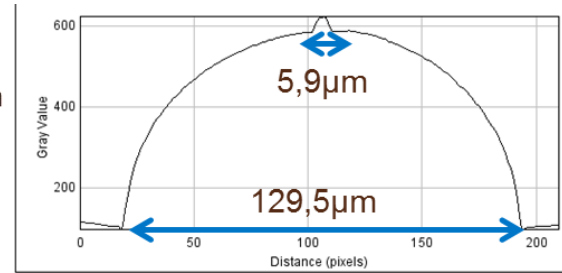
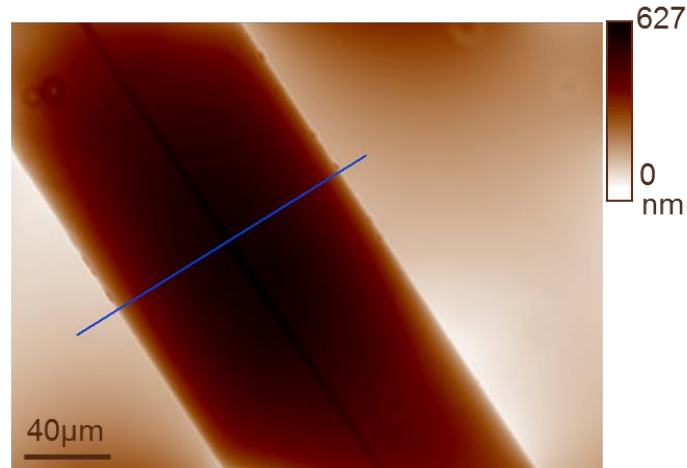
Mesures de composition, changements d'état

Mesures de topographie

Mesures de concentration, température, pression, densité, ...

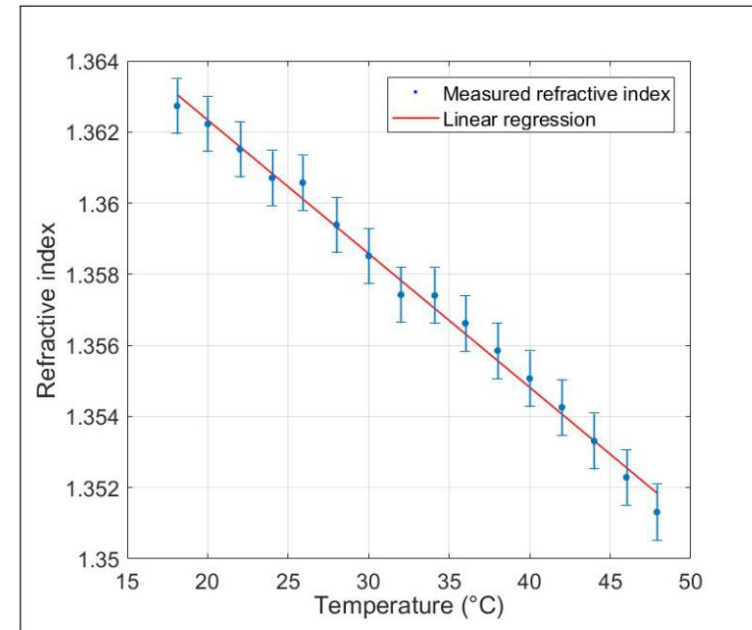
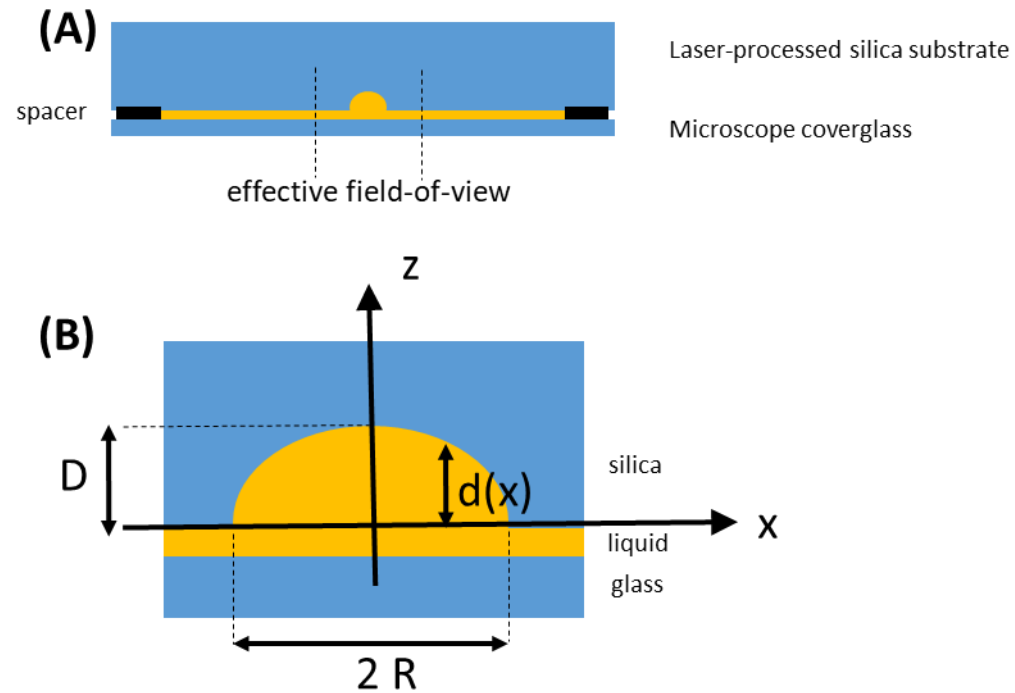
# Imagerie quantitative de phase

## Imagerie de phase quantitative de guides d'ondes



# Imagerie quantitative de phase

Mesure de profil / indice / indice =  $f(T, C, \dots)$

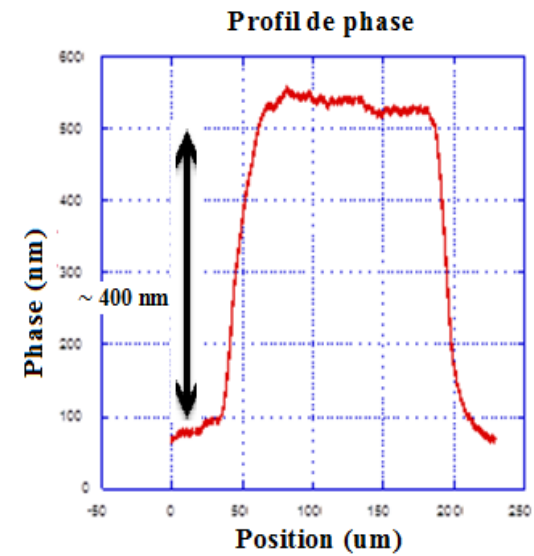
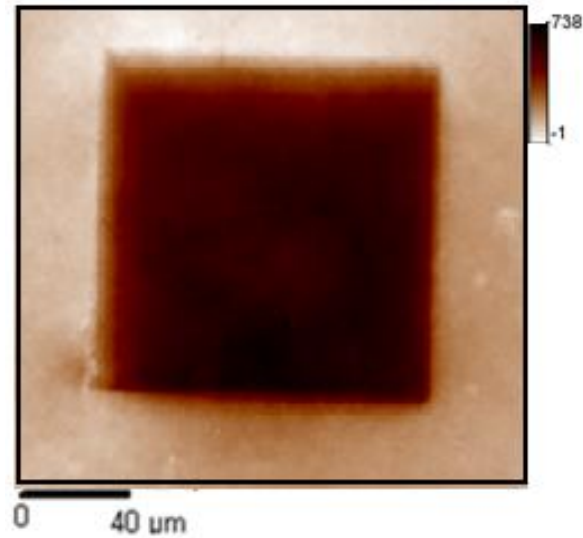
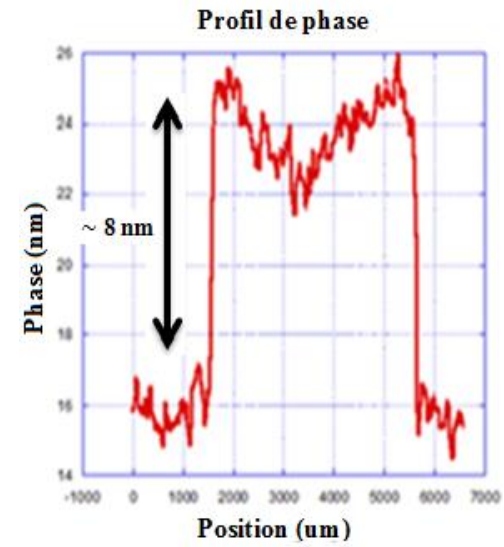
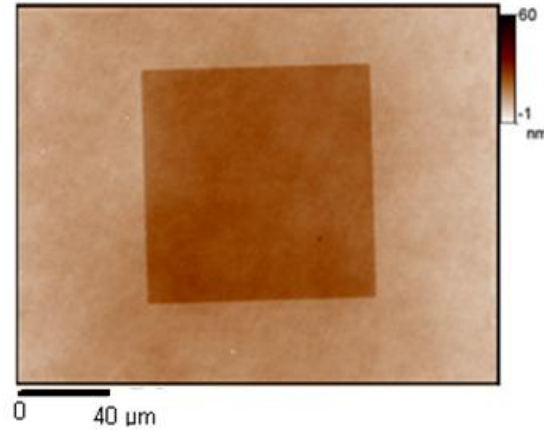


**Fig. 8.** Measured refractive index of ethanol in function of the temperature - Linear regression for ethanol gives  $\frac{dn_{\text{ethanol}}}{dT} = -3.76 \times 10^{-4} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$



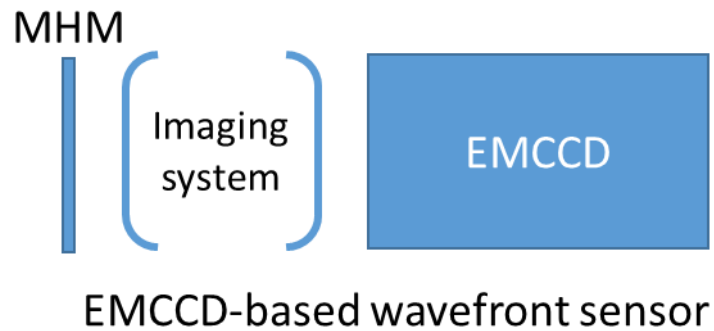
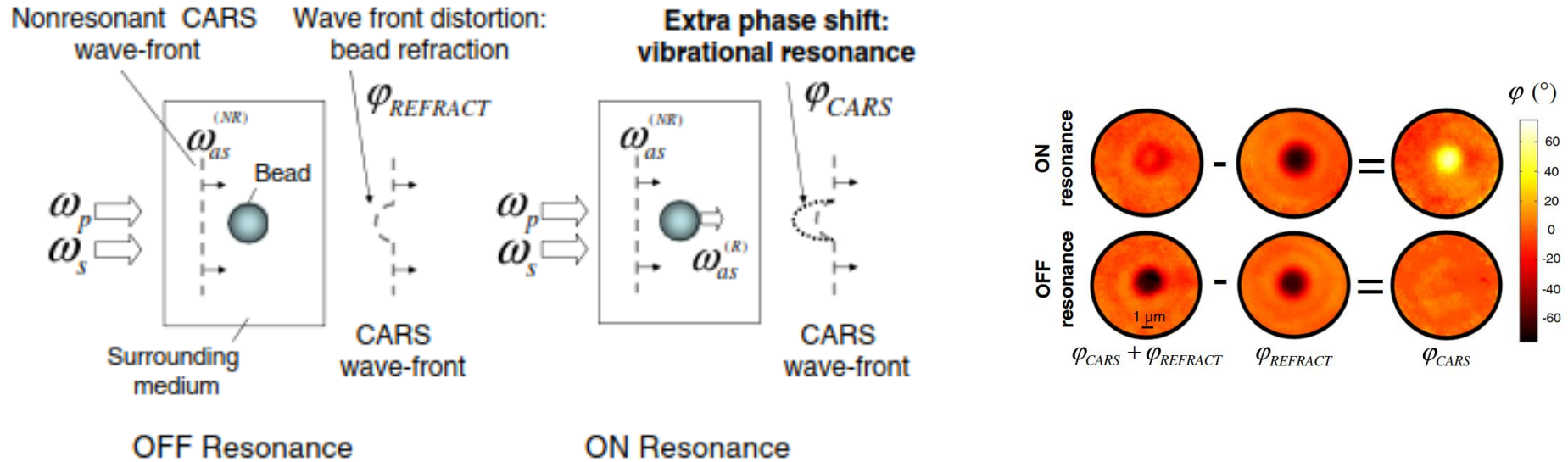
# Imagerie quantitative de phase

## QPI applied to thin films



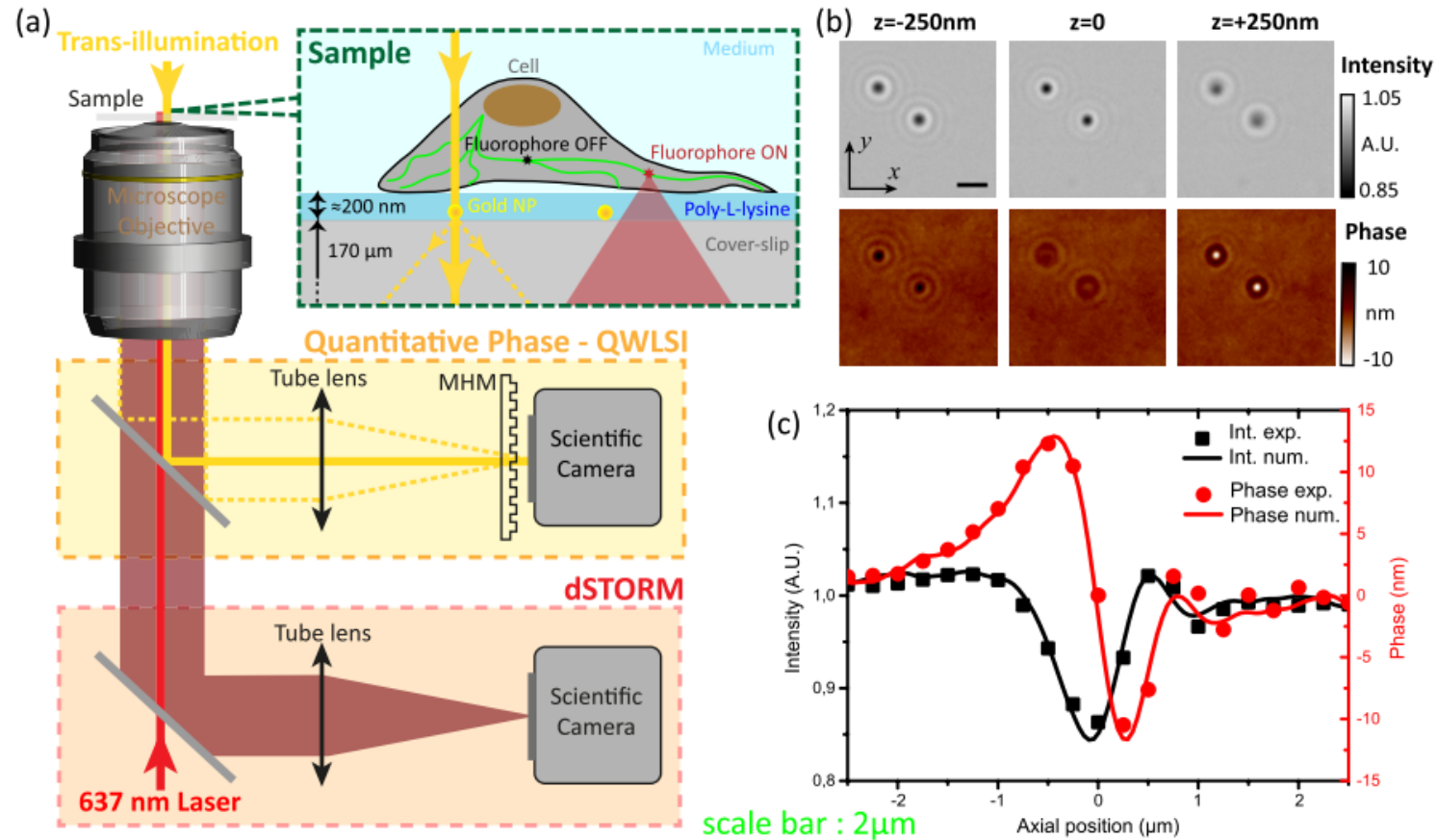
# Imagerie quantitative de phase

## Measuring complex electromagnetic field at resonance



Second produit commercial : SID4 Element (2015)

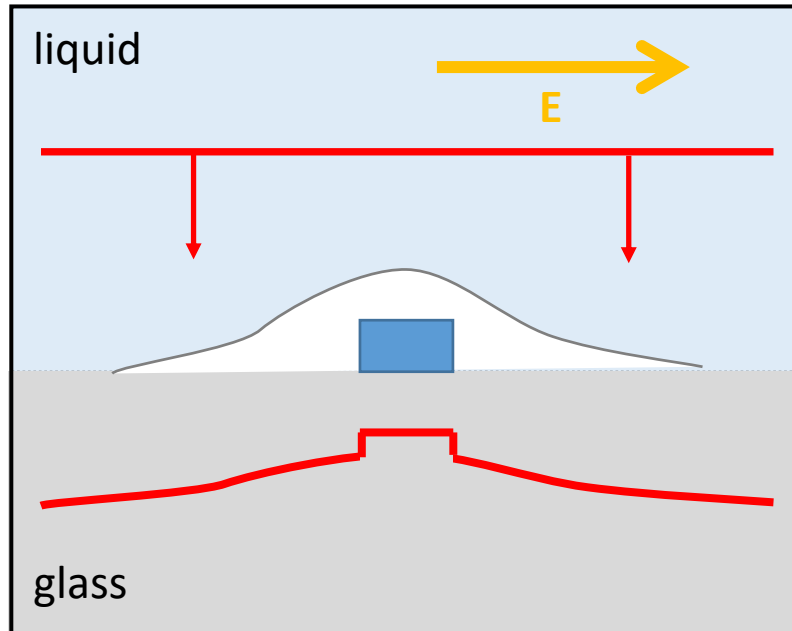
## 3D monitoring for ultra-resolution microscopy



Nanoparticle localization precision : **1,5 nm (X/Y)** ; **6,5 nm (Z)** @ **50 frames/s**

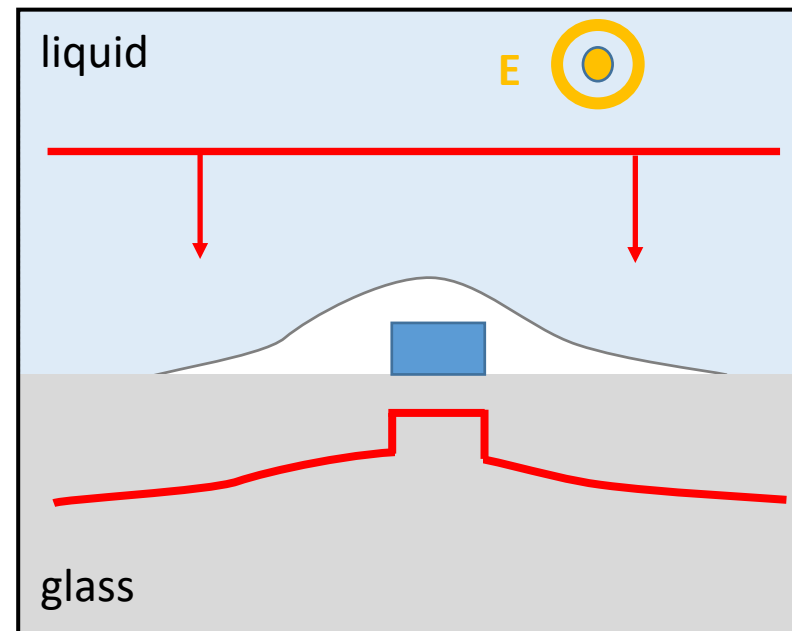
# Imagerie de retardance optique par analyse de front d'onde

## Making differential WF measurement with crossed polarization



(1)

Linearly polarized  
« Reference » wavefront

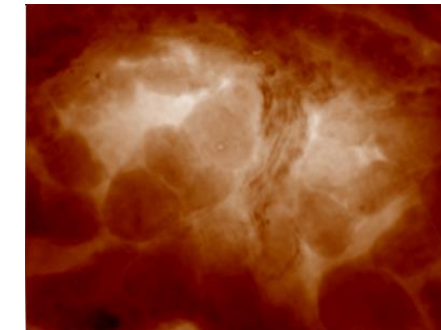


(2)

Cross-polarized second  
wavefront

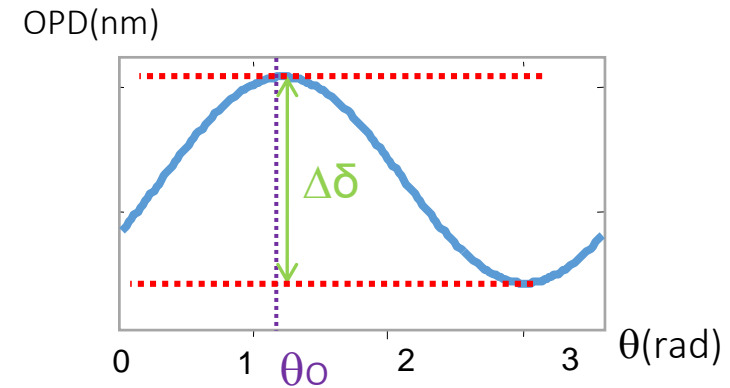
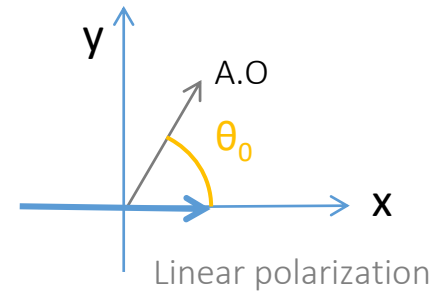
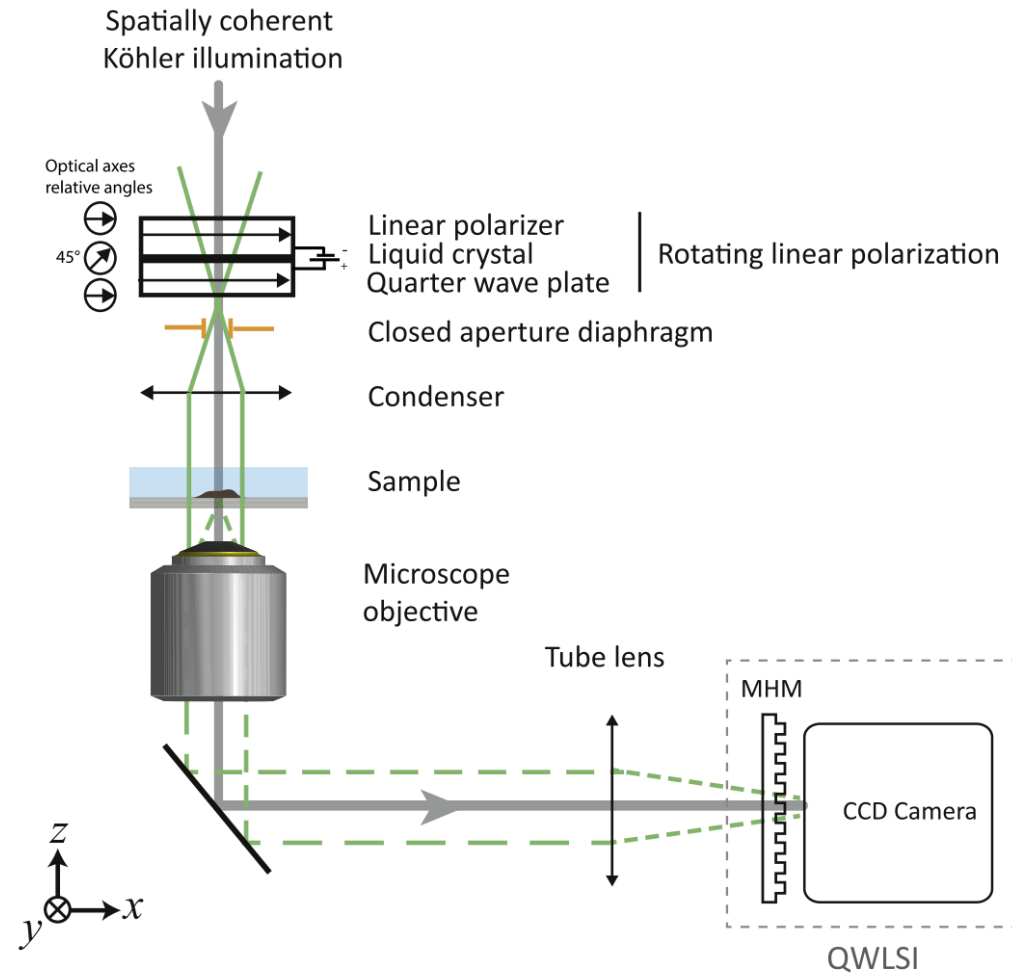


Only the optically **birefringent parts** of the sample are visible



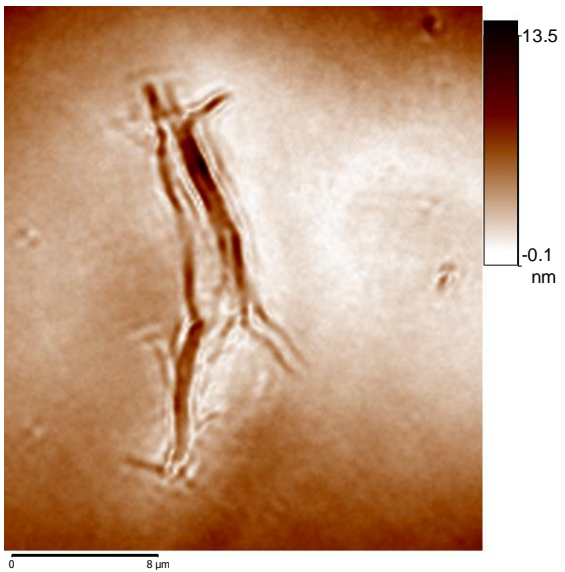
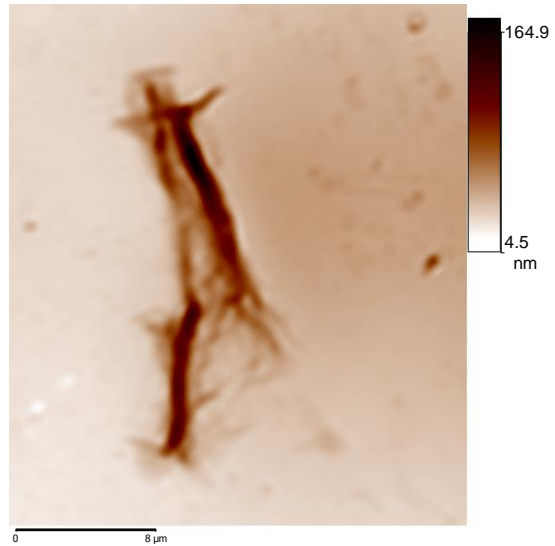
# Imagerie de retardance optique par analyse de front d'onde

## Experimental procedure



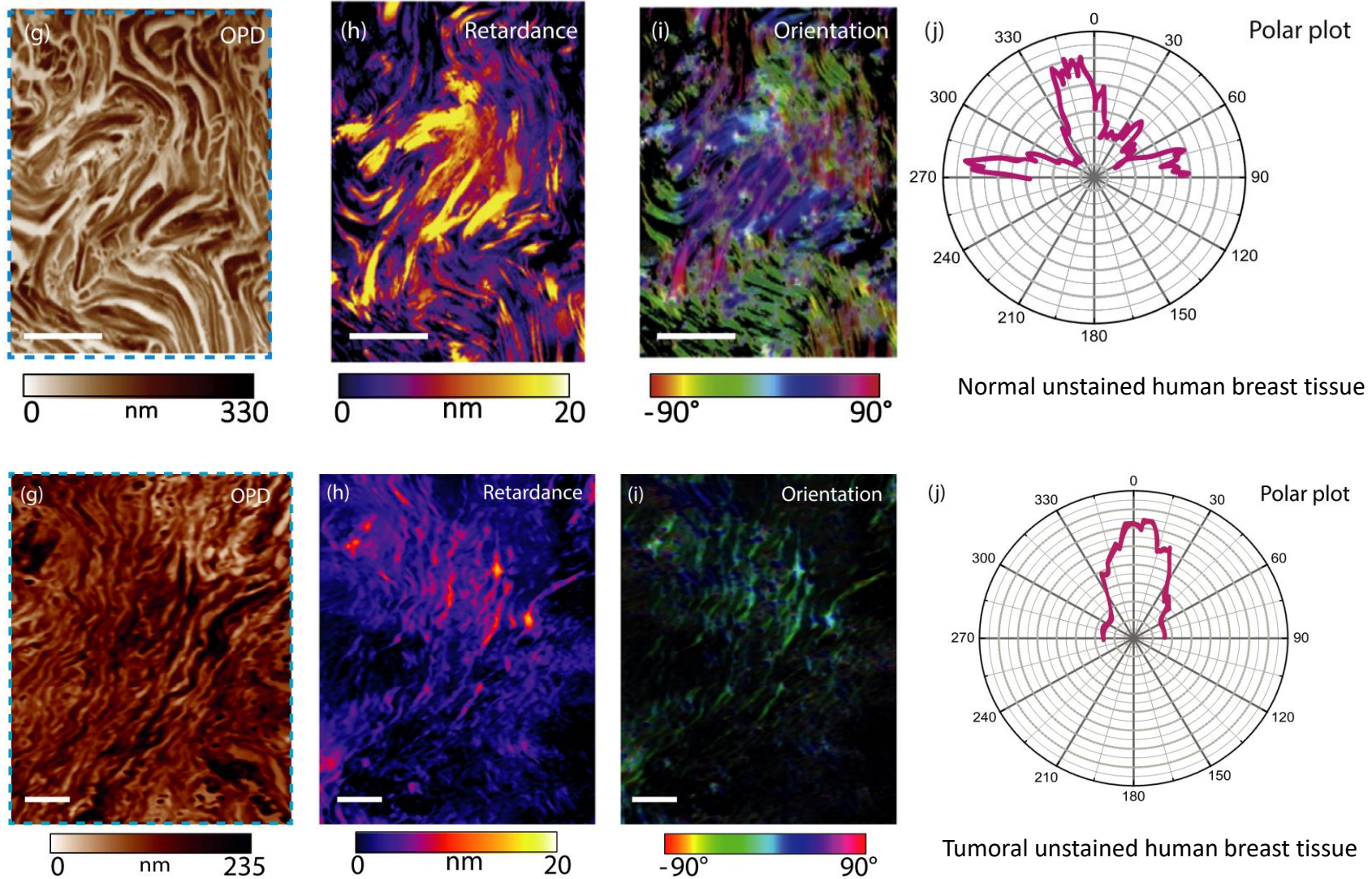
# Imagerie de retardance optique par analyse de front d'onde

## Amyloïd fibers (in vitro experiment)



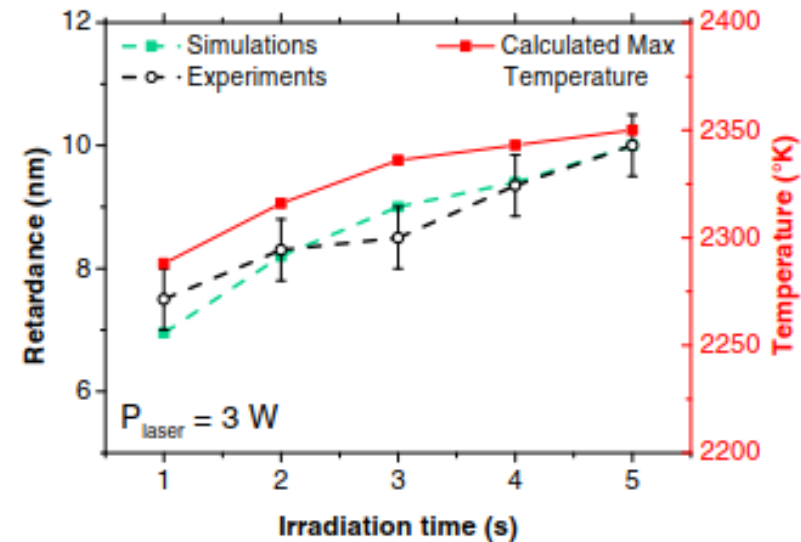
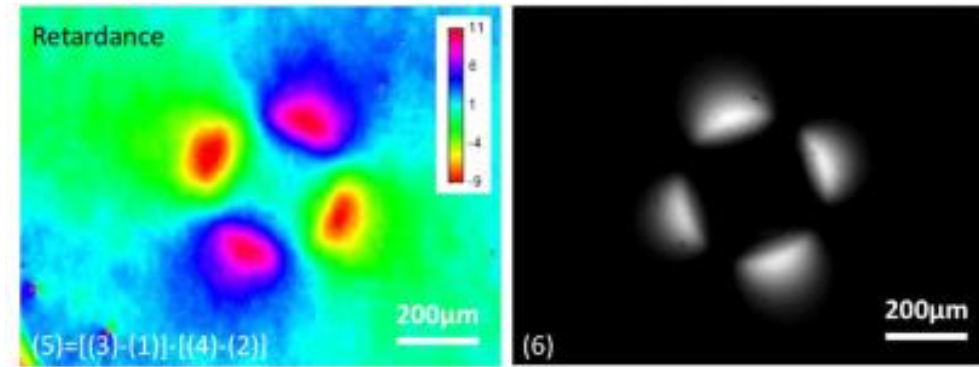
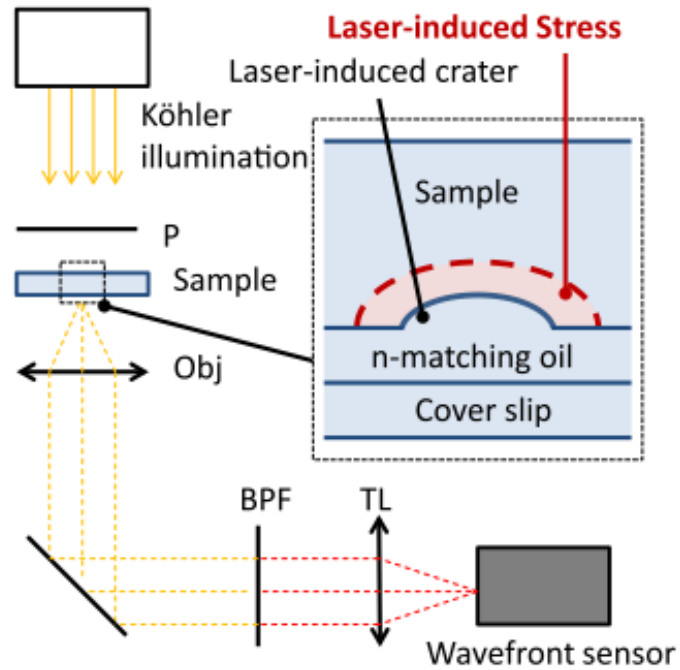
# Imagerie de retardance optique par analyse de front d'onde

## Imagerie de coupes tissulaires (tumeurs / tissus sains)



# Imagerie de retardance optique par analyse de front d'onde

## Mesures de contraintes autour de cratères usinés par laser





# Remerciements



A venir !!

ImaBio CNRS ImaBio 20 ans

ImaBio fête ses 20 ans

2003 2023

Nanoscopies  
Imagerie en profondeur  
Nouvelles Sondes Fluorescentes  
Imagerie sans marquage  
Biologie Informatique  
Signalisation & Morphogénèse

Imagerie vivante

► Colloque du GDR ImaBio  
du 10 au 12 juillet 2023

Institut de Physique du Globe de Paris  
CNRS - Université Paris Cité

3 jours de Rencontres,  
Conférences, & Posters  
Inscription gratuite mais obligatoire

► <https://imabio-cnrs.fr>

Crédits photos : Imabio, Maxime, Benjamin, Marianne, Philippe

# Session 1: Les fondamentaux

*Chairman : Jérôme Primot*

- *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes. Jean-Christophe Chanteloup, LULI*
- *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope. Serge Monneret, Institut Fresnel*
- **PISTIL, Cindy Bellanger, ONERA**
- *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X. Adrien Stolidi, CEA*



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

PISTIL

C. Bellanger, M. Deprez, B. Rouzé, T. Rousseaux, J. Primot

ONERA / DOTA

PALM

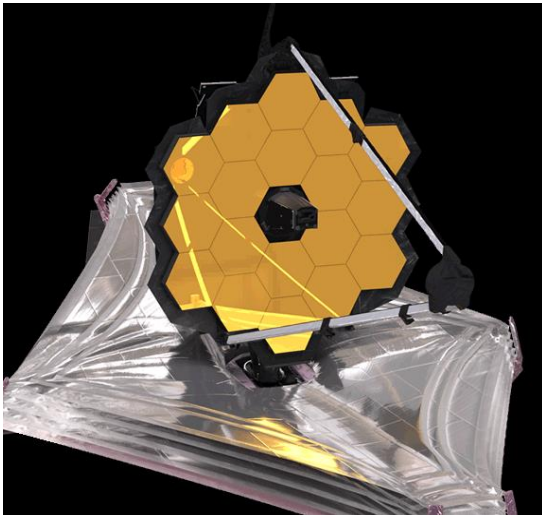
Laboratoire d'Excellence  
Physique : Atomes Lumière Matière

# PISTIL

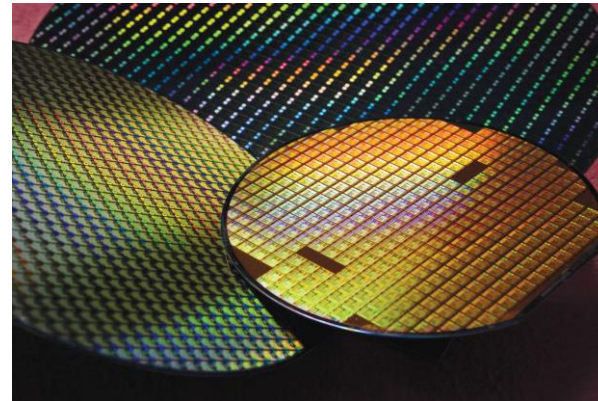
PISTIL signifie PISton et TILt interférométrie

Analyseur de phase dédié aux surfaces d'onde segmentées

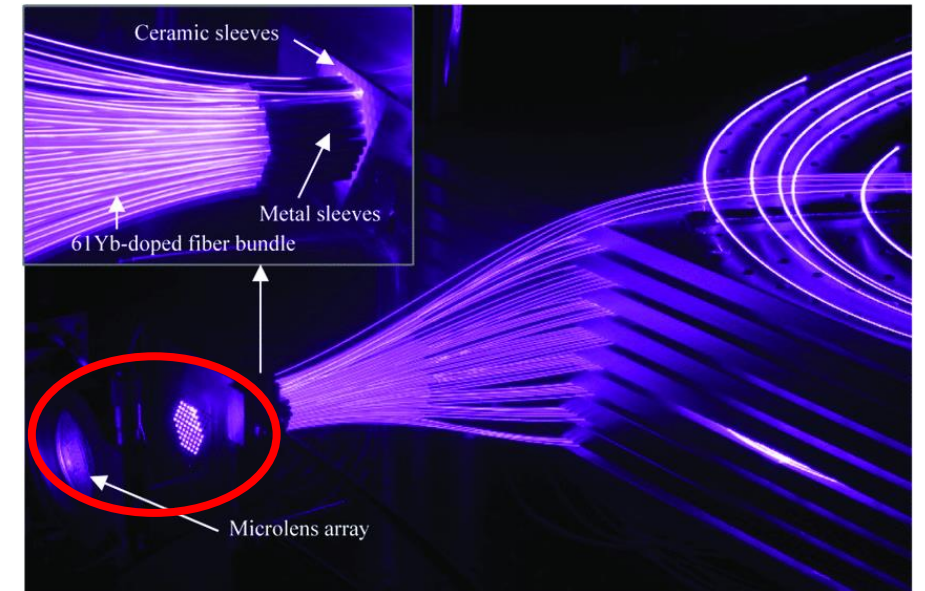
Astronomie



Micro-composants

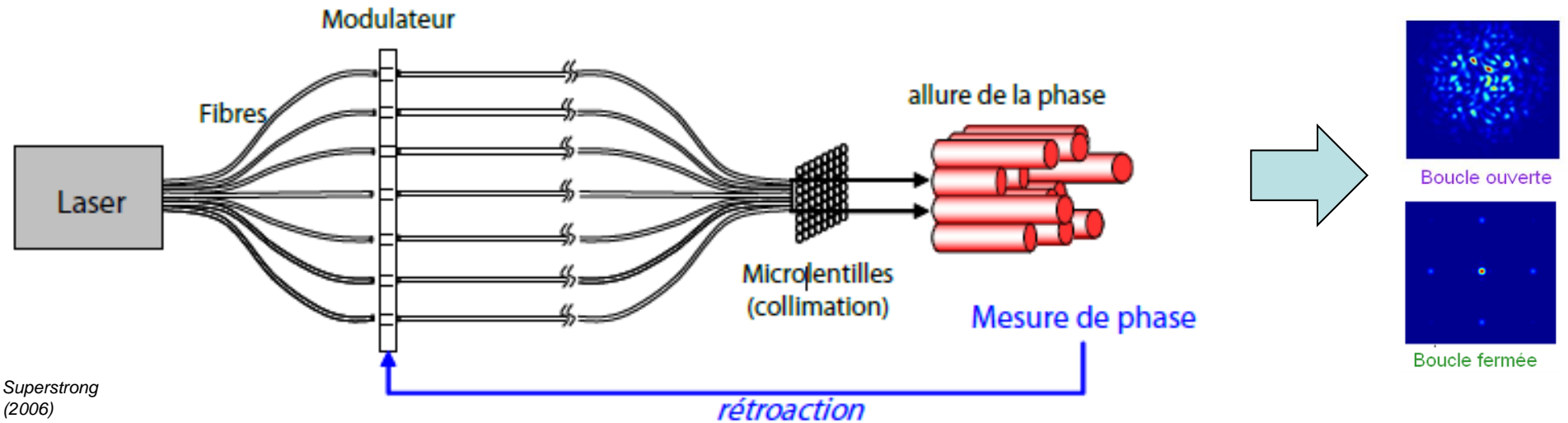


Lasers intenses

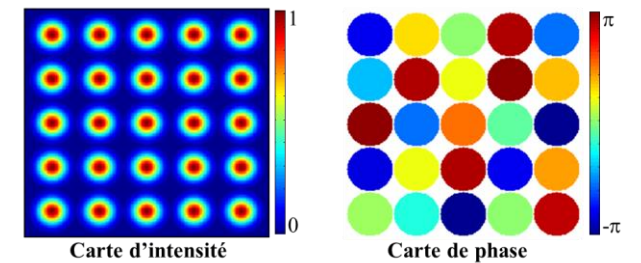


## LES ORIGINES

**PISTIL** : un dérivé de l'interférométrie à décalage quadri-latéral, né dans le contexte des lasers intenses

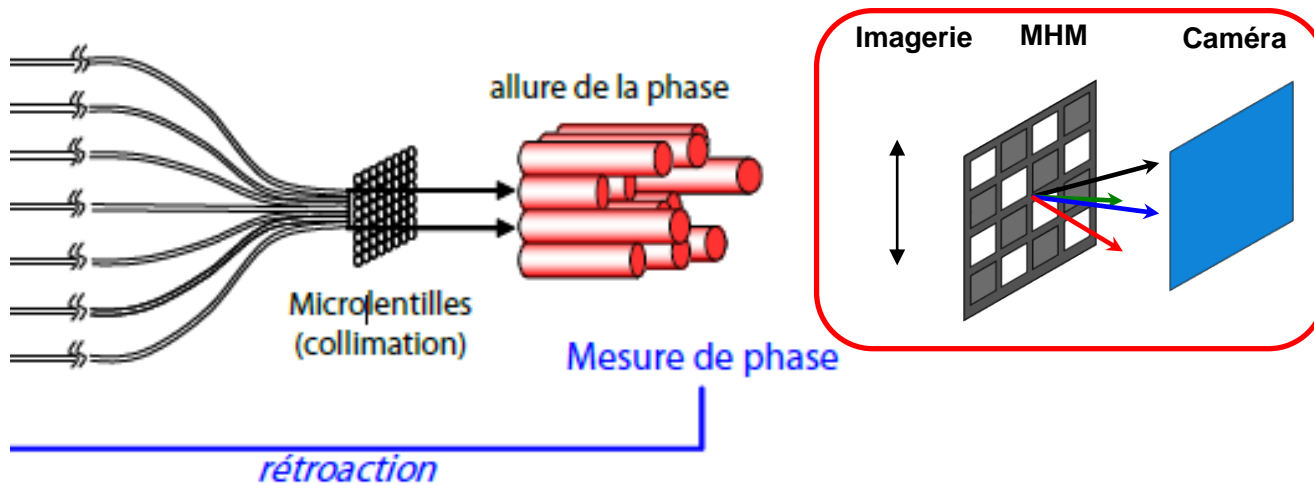


G. Mourou et al., *Third International Conference on Superstrong fields in Plasmas*, AIP Conference Proceeding, 827 (2006)

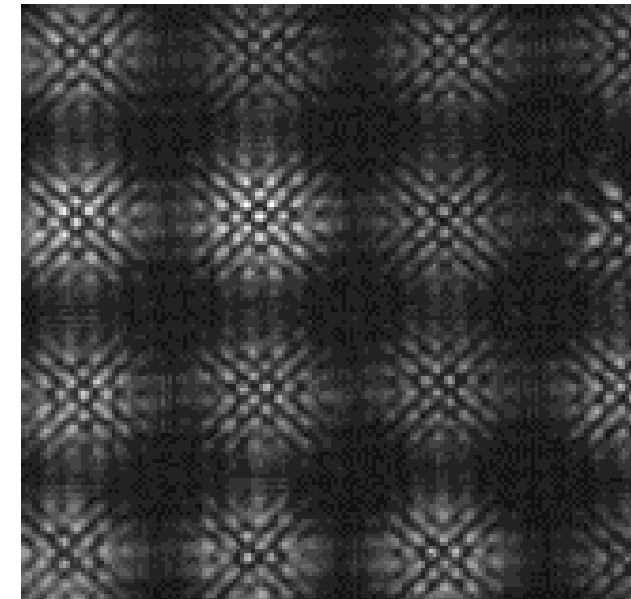


Surface segmentée, régulière et lacunaire

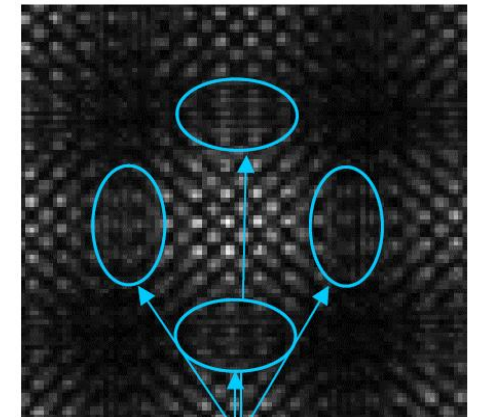
## Mesure du champ proche par IDQL



### Interférogramme expérimental



→ Peu de franges d'intérêt, peu de contraste

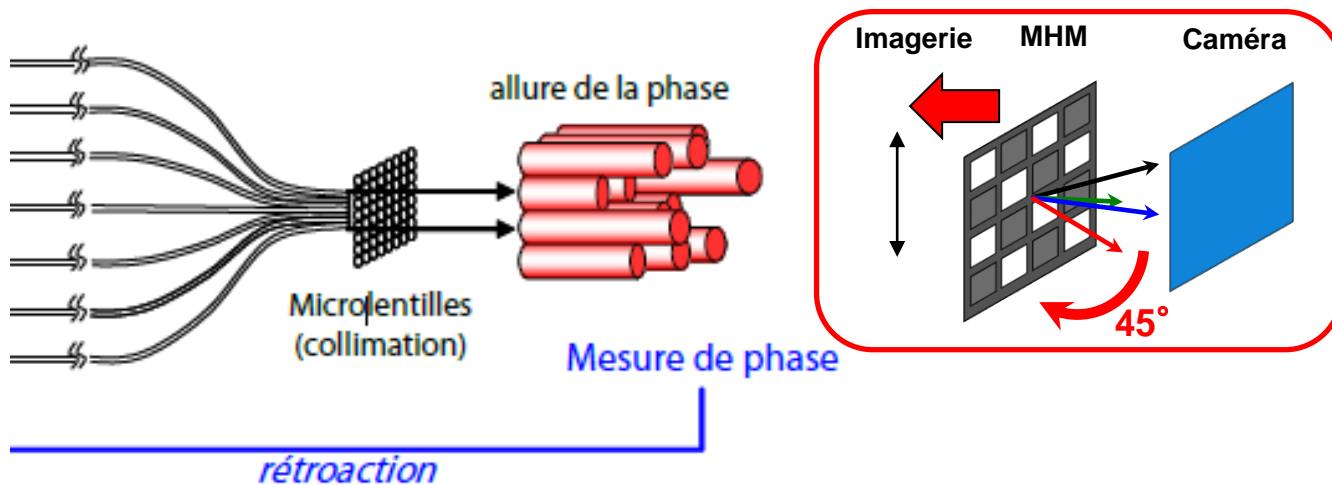


Franges d'intérêt

Thèses B. Toulon (2009) – C. Bellanger (2010)



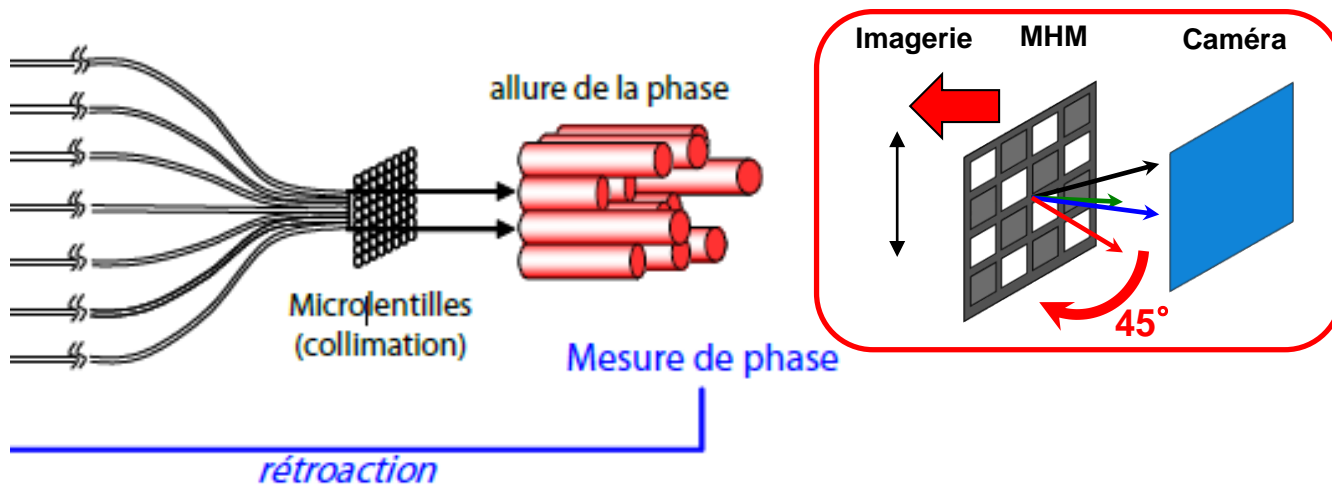
## Optimisation des zones d'interférences



- Rotation de 45° du réseau
- Augmentation de la distance réseau / détecteur

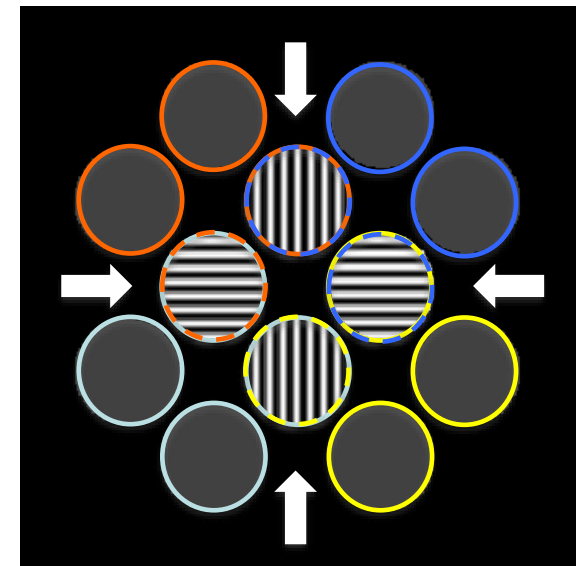
## Optimisation des zones d'interférences

Evolution des faisceaux le long de leur propagation



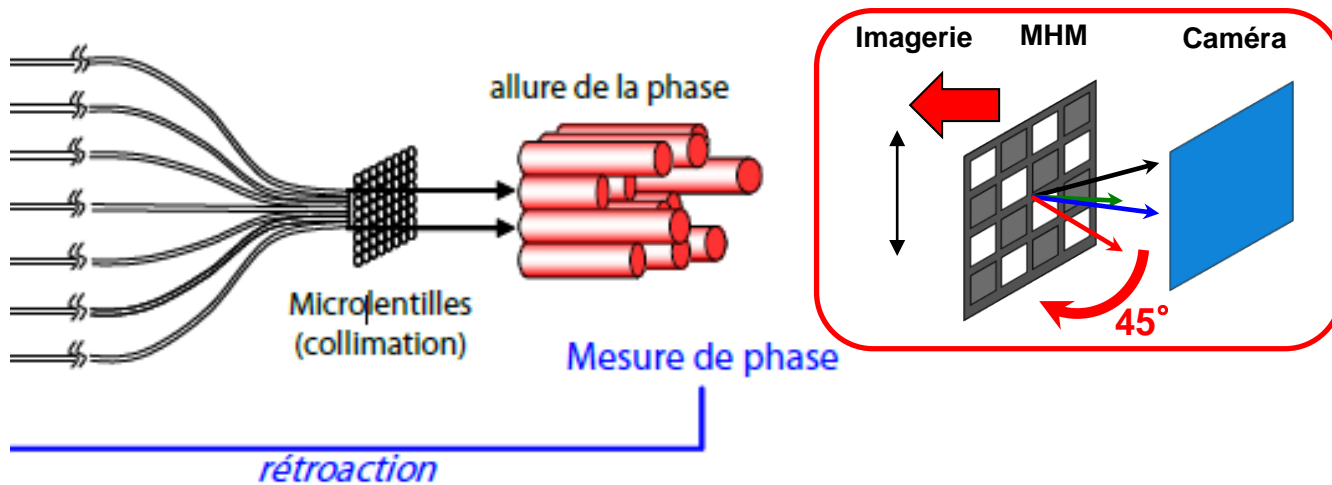
Orientation des faisceaux

Orientation des répliques

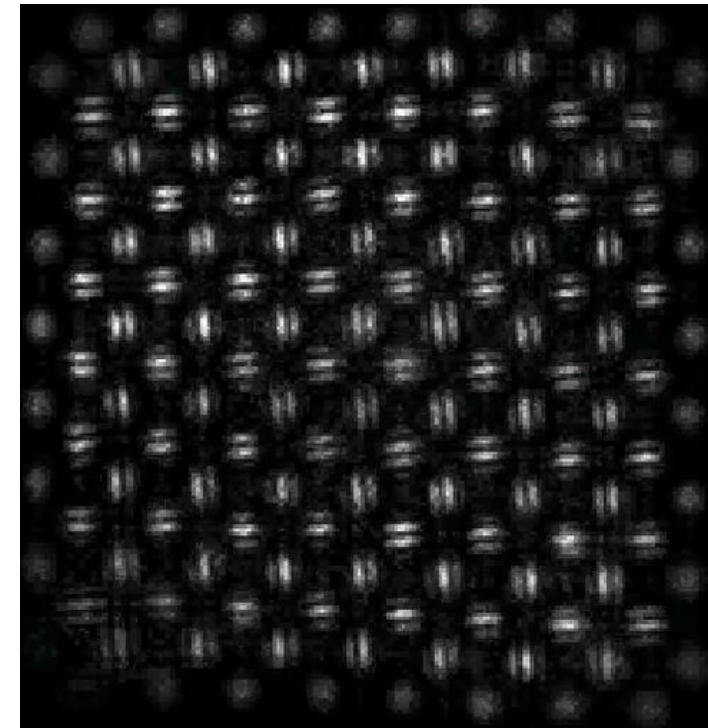


Il existe un plan dans lequel on a recouvrement parfait des répliques des faisceaux adjacents

## Optimisation des zones d'interférences



## Interférogramme expérimental



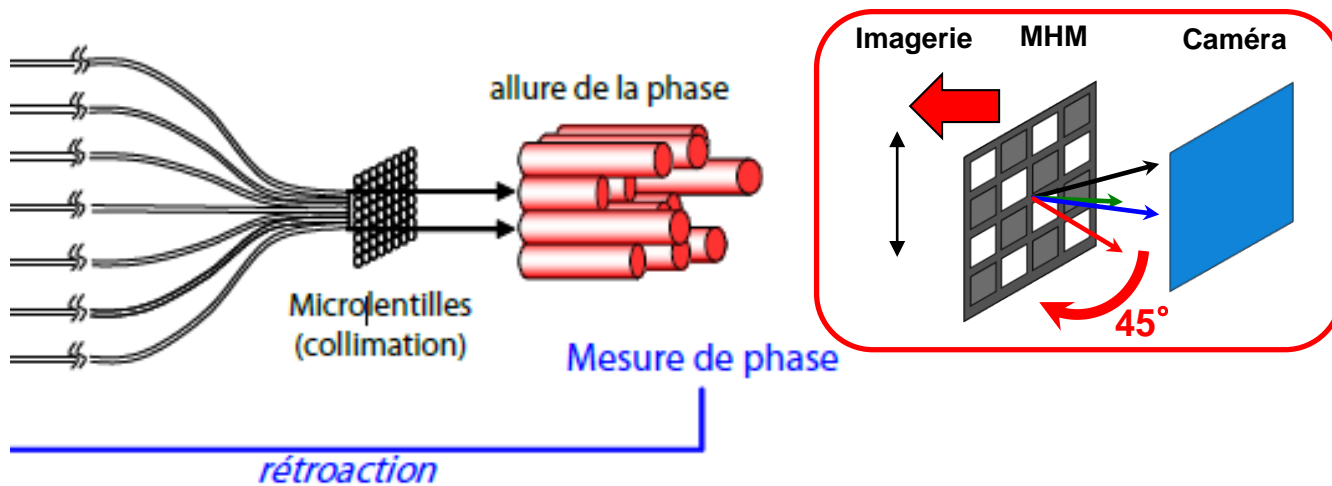
Mode  
« 2x2 ultime »

Futur PISTIL

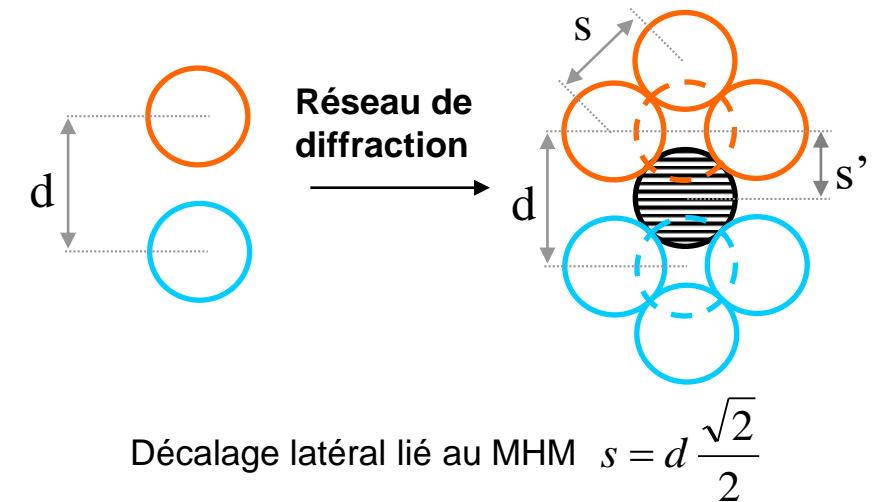
→ Toute l'énergie est consacrée aux franges d'intérêt

C. Bellanger, et al, Opt. Lett 35(23), 3931-3933, 2010.

## Optimisation des zones d'interférences



### Pourquoi ça a fonctionné ?

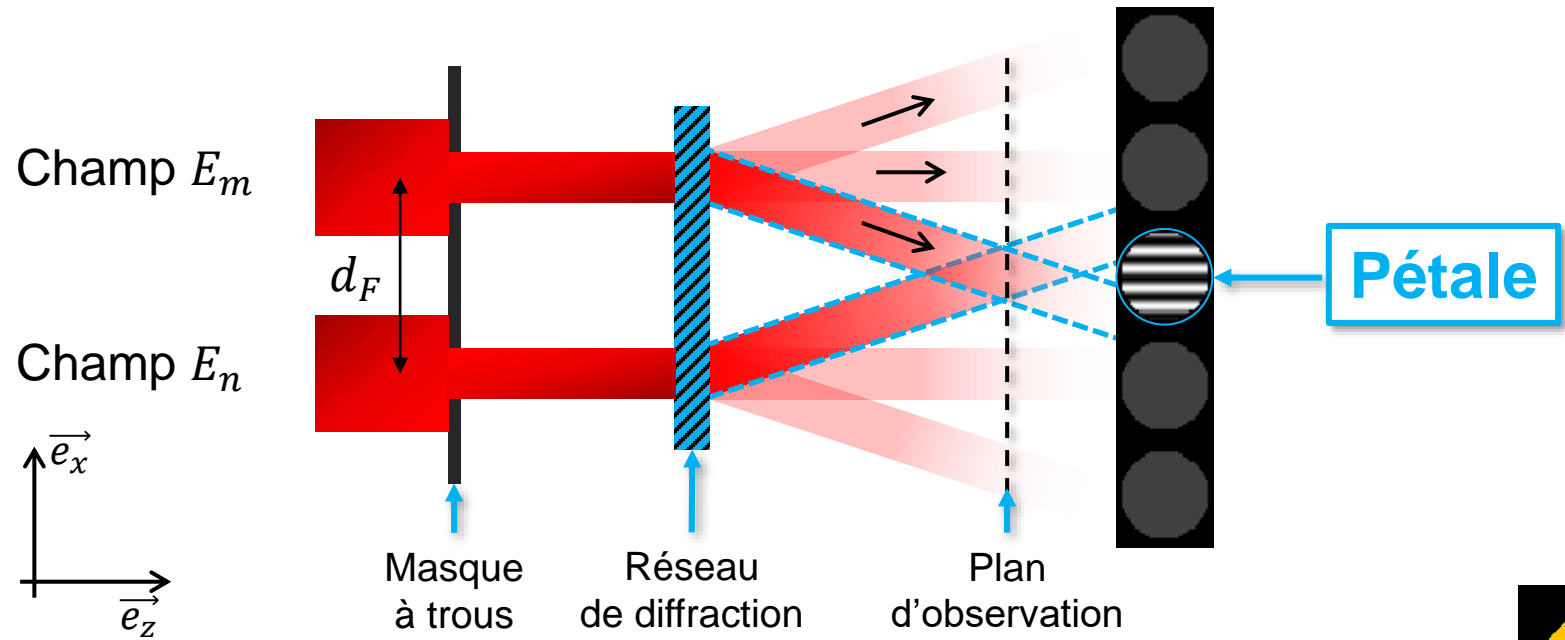


→ Parce que les faisceaux étaient disjoints  
(Taux de remplissage de chaque microlentille faible)

## LE PRINCIPE

# Le principe

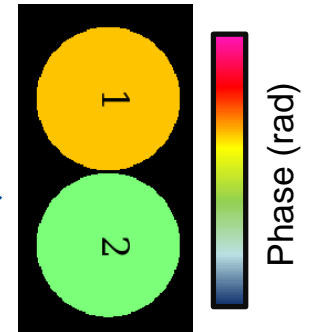
Faire interférer la surface d'onde issue de chaque segment avec son voisin



**PISTIL est sensible aux différences de phases entre deux segments adjacents**

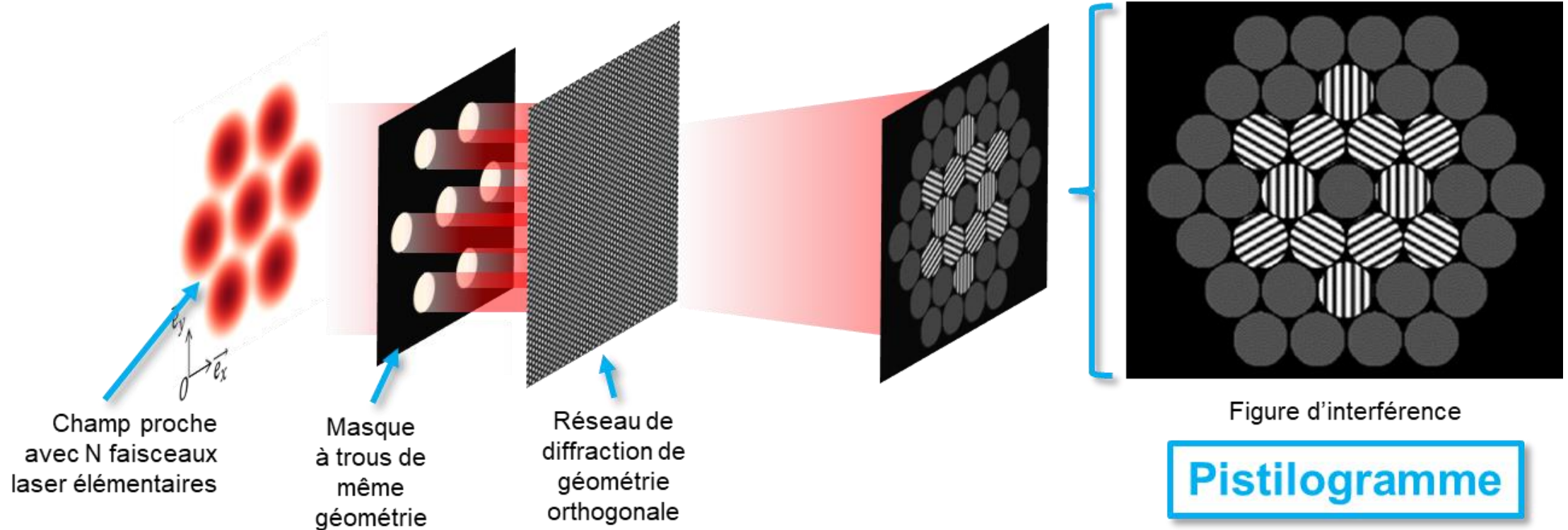
$$I(x) \propto 1 + \cos(kx + \Delta\varphi)$$

$\varphi_n - \varphi_m$



# Le principe

## Schéma général



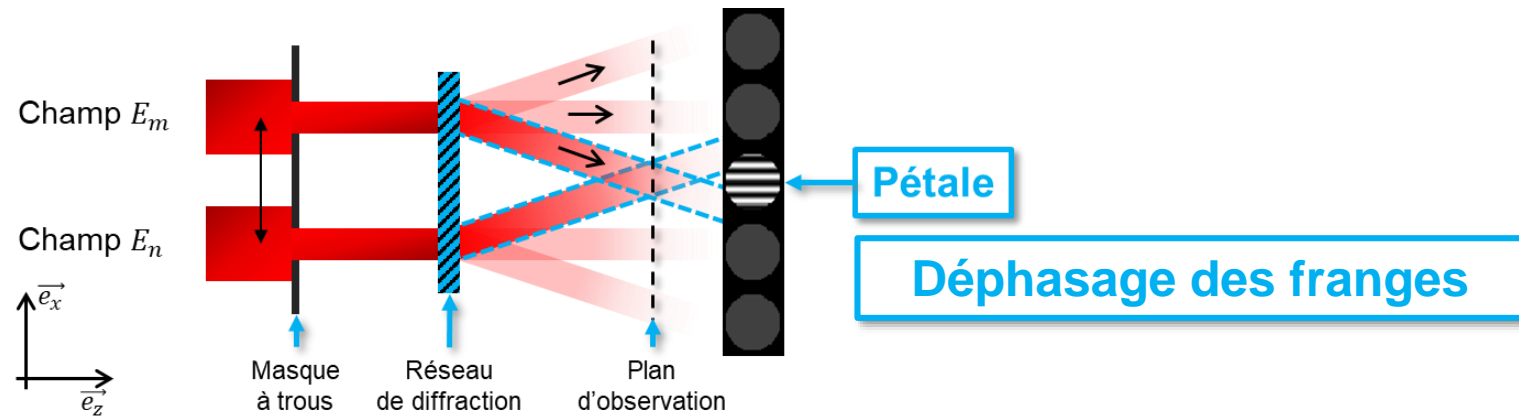
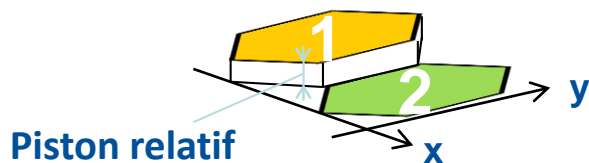
Brevet FR14.58876

Deprez, et al, Opt. Lett 41(6), 1078-1081, 2016

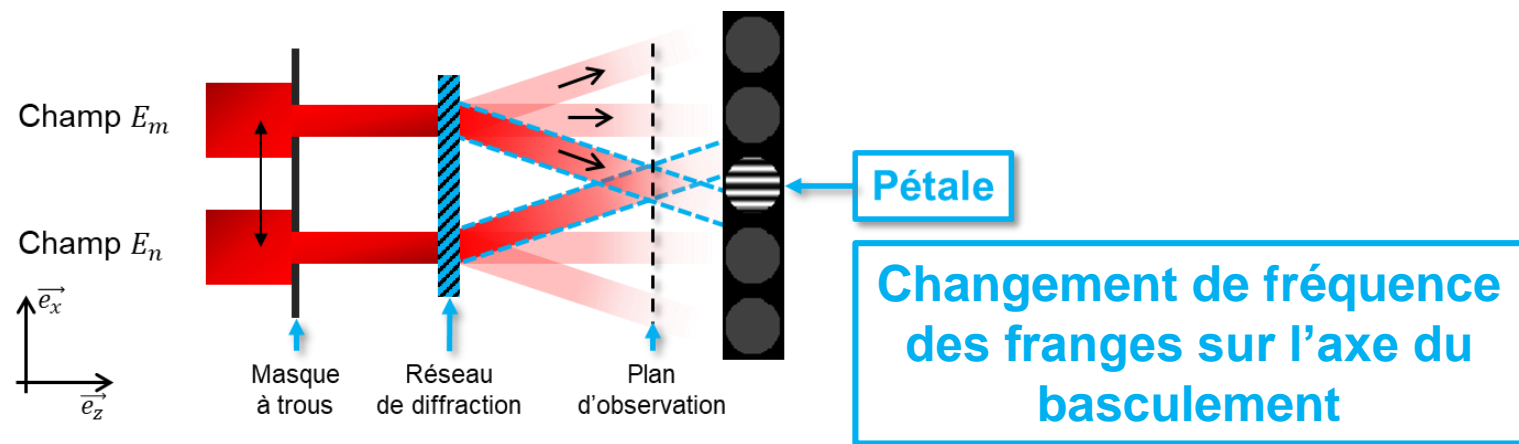
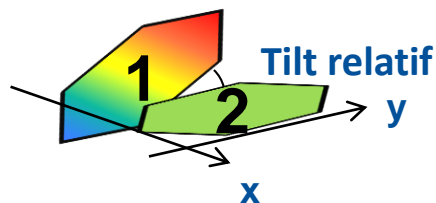
# Le principe

## Principe de PISTIL : Réponse aux défauts relatifs

### Le piston

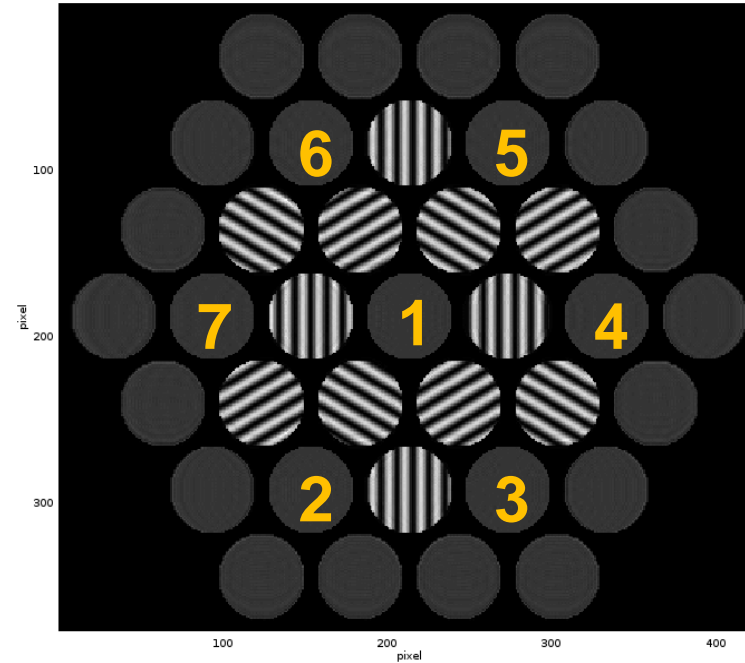
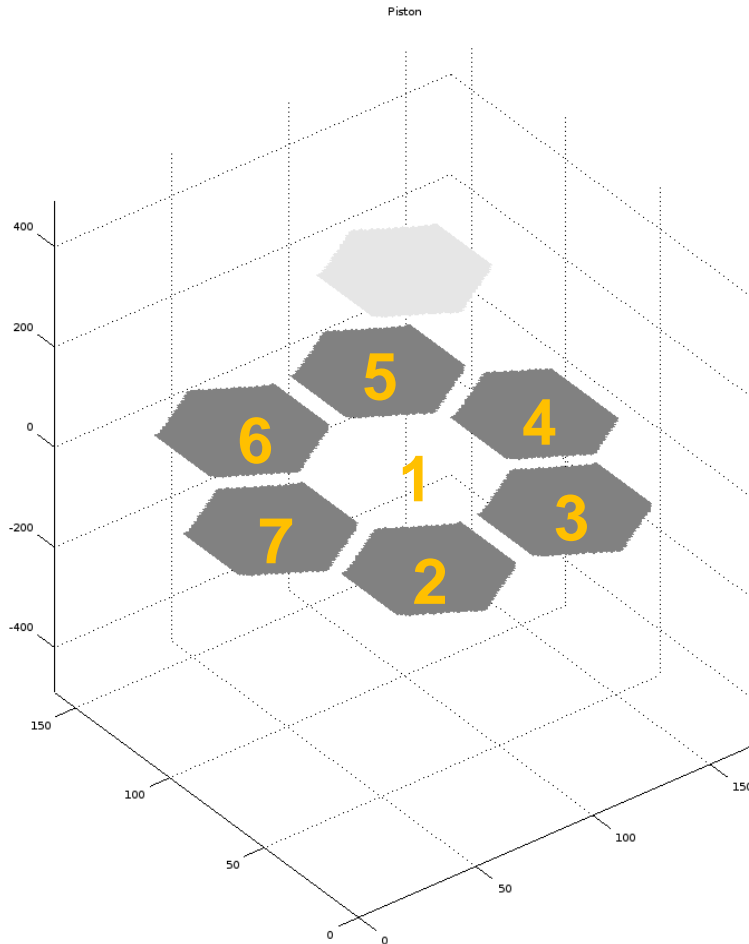


### Les basculements (tip et tilt)



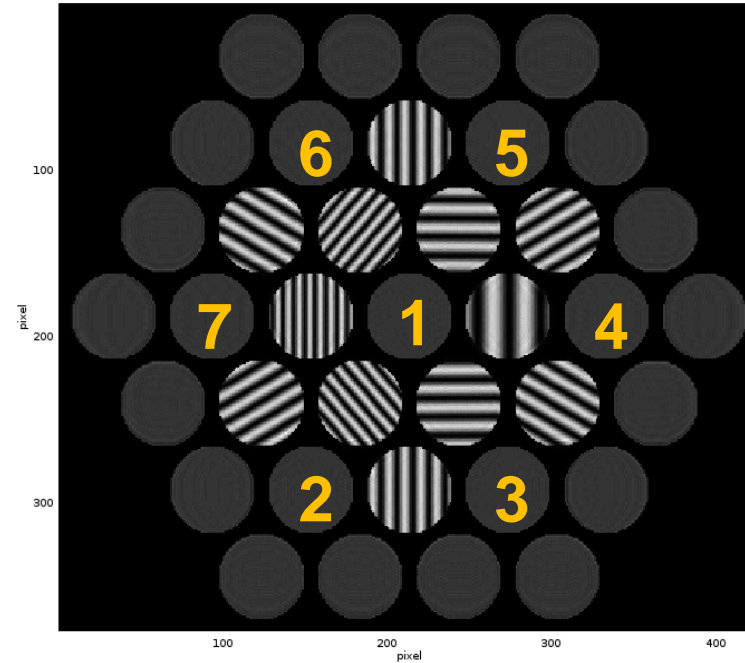
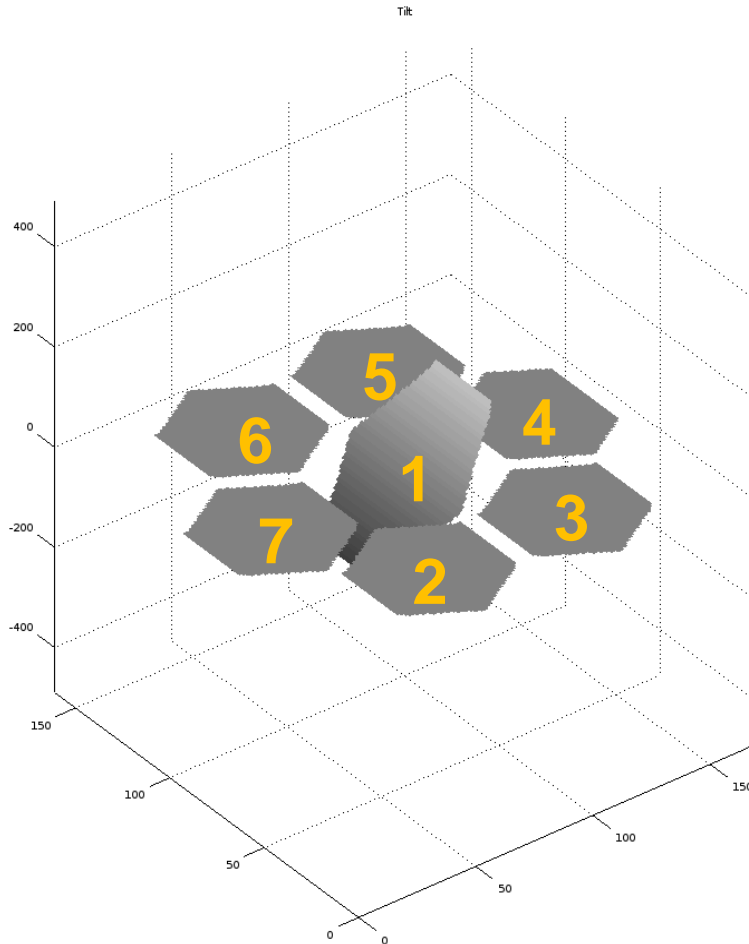


# Le principe



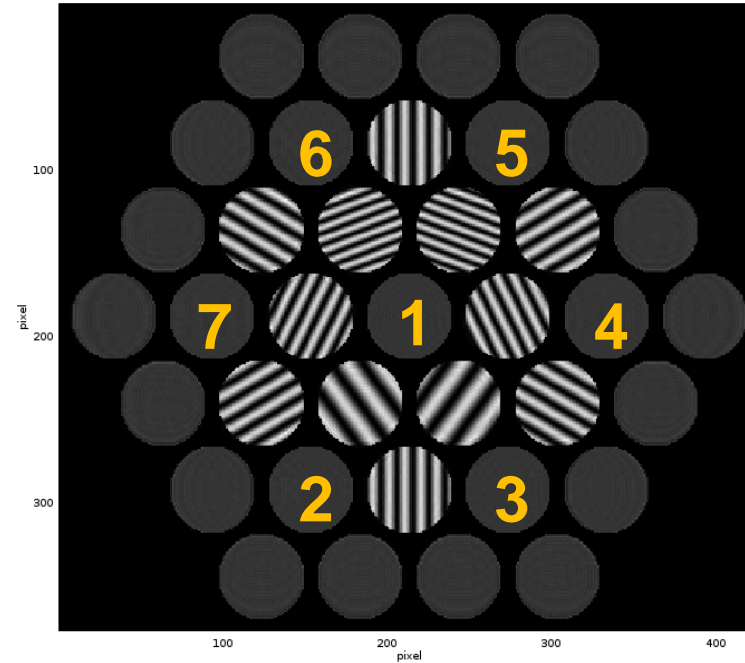
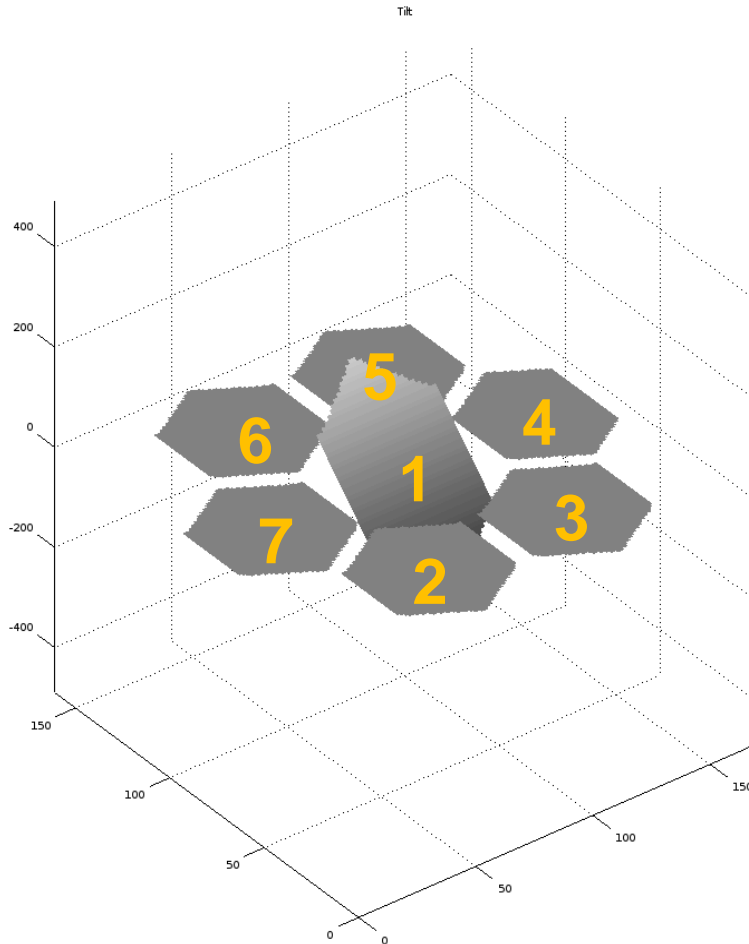
## Effet d'un piston de phase

# Le principe



## Effet d'un tip de phase

# Le principe

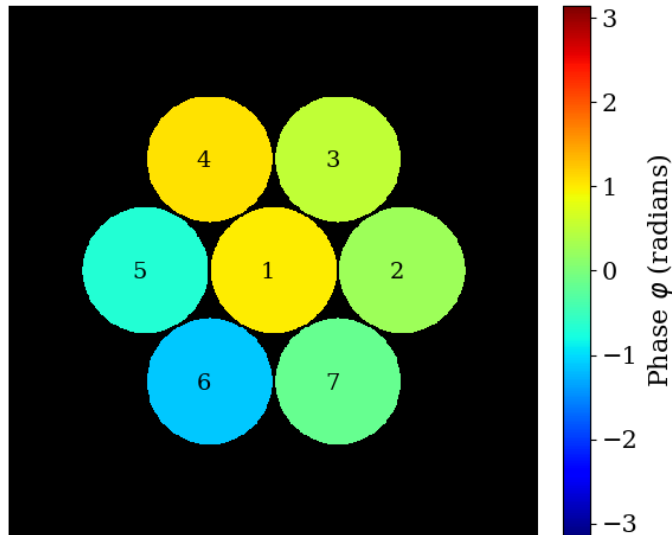


## Effet d'un tilt de phase

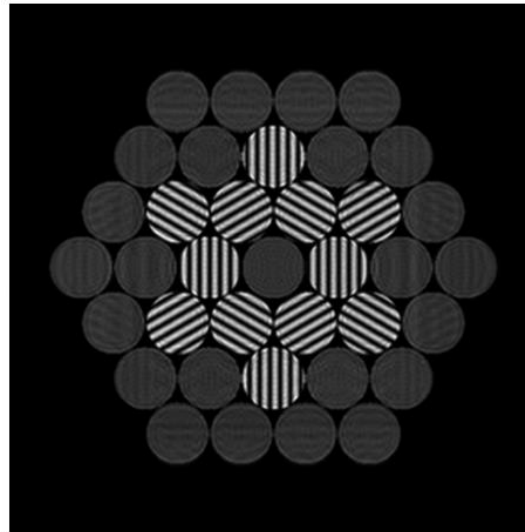
# Le principe

## Analyse

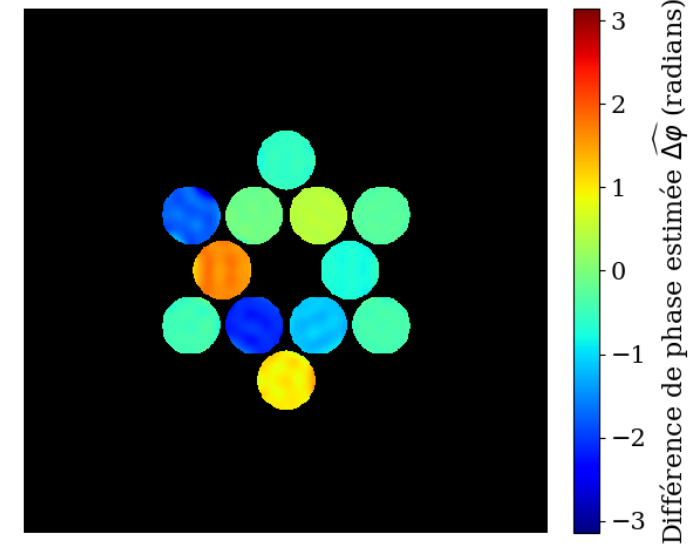
Front d'onde  
→ N phases



Pistilogramme  
→ Encode les différences

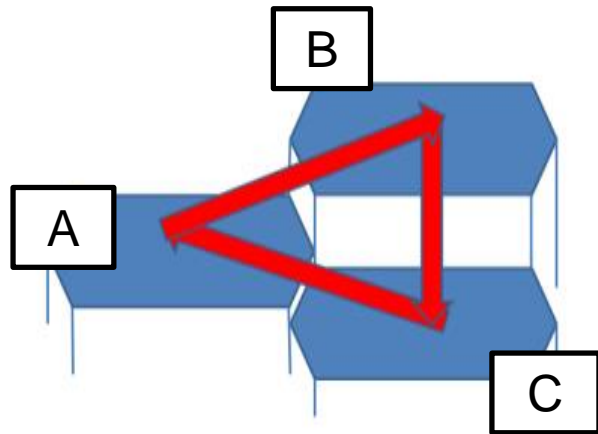


Estimation des  
Différences de phases



# Le principe

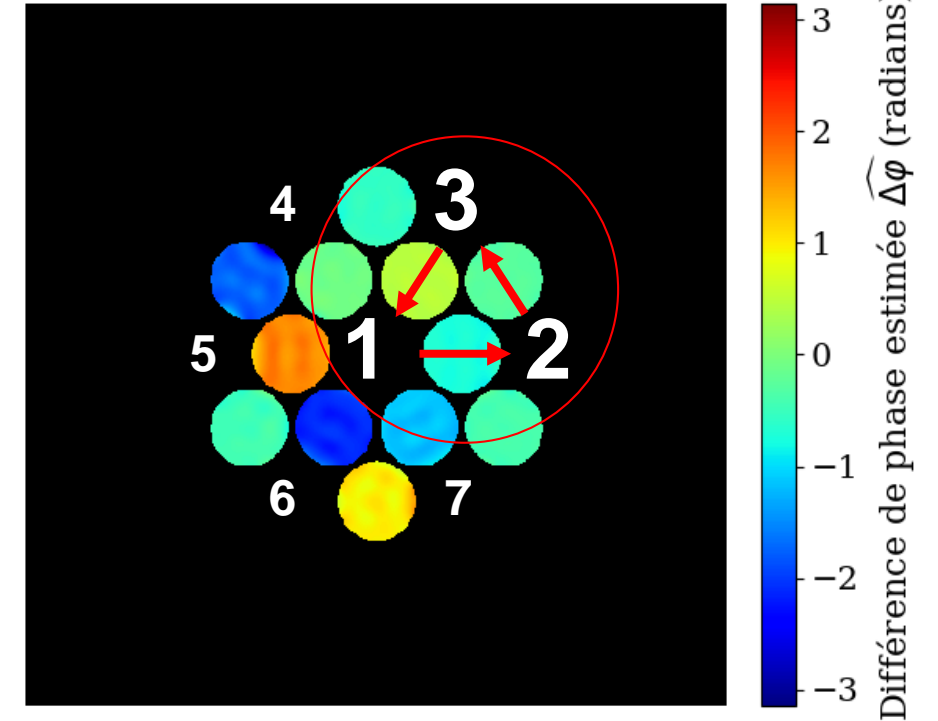
## Estimation de l'erreur : les clôtures de phase



$$\mathbf{AB} + \mathbf{BC} + \mathbf{CA} = \mathbf{0}$$

$$(\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_A) + (\mathbf{x}_C - \mathbf{x}_B) + (\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_C) = \mathbf{0}$$

$$\Delta \mathbf{x}_{AB} + \Delta \mathbf{x}_{BC} + \Delta \mathbf{x}_{CA} = \mathbf{0}$$



$$\Delta \varphi_{12} + \Delta \varphi_{23} + \Delta \varphi_{31} = 0$$

En théorie...

# Le principe

## Estimation de l'erreur : les clôtures de phase

En pratique...

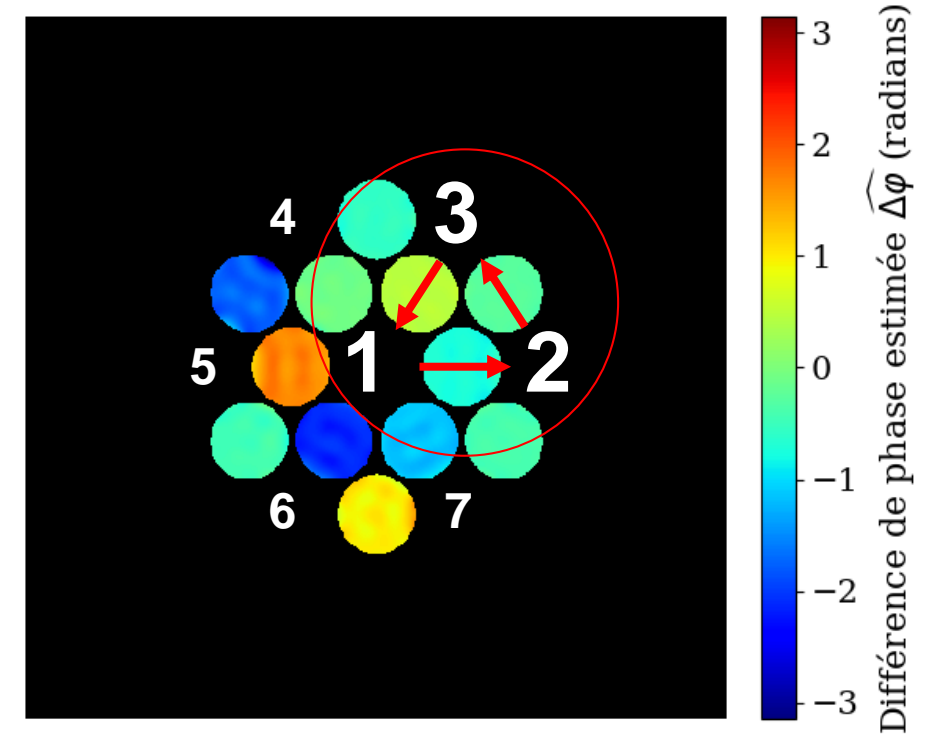
$$\Delta\varphi_{12} + \Delta\varphi_{23} + \Delta\varphi_{31} = \varepsilon_l \neq 0$$



Variance de  $\varepsilon_l$



Variance de l'erreur d'estimation



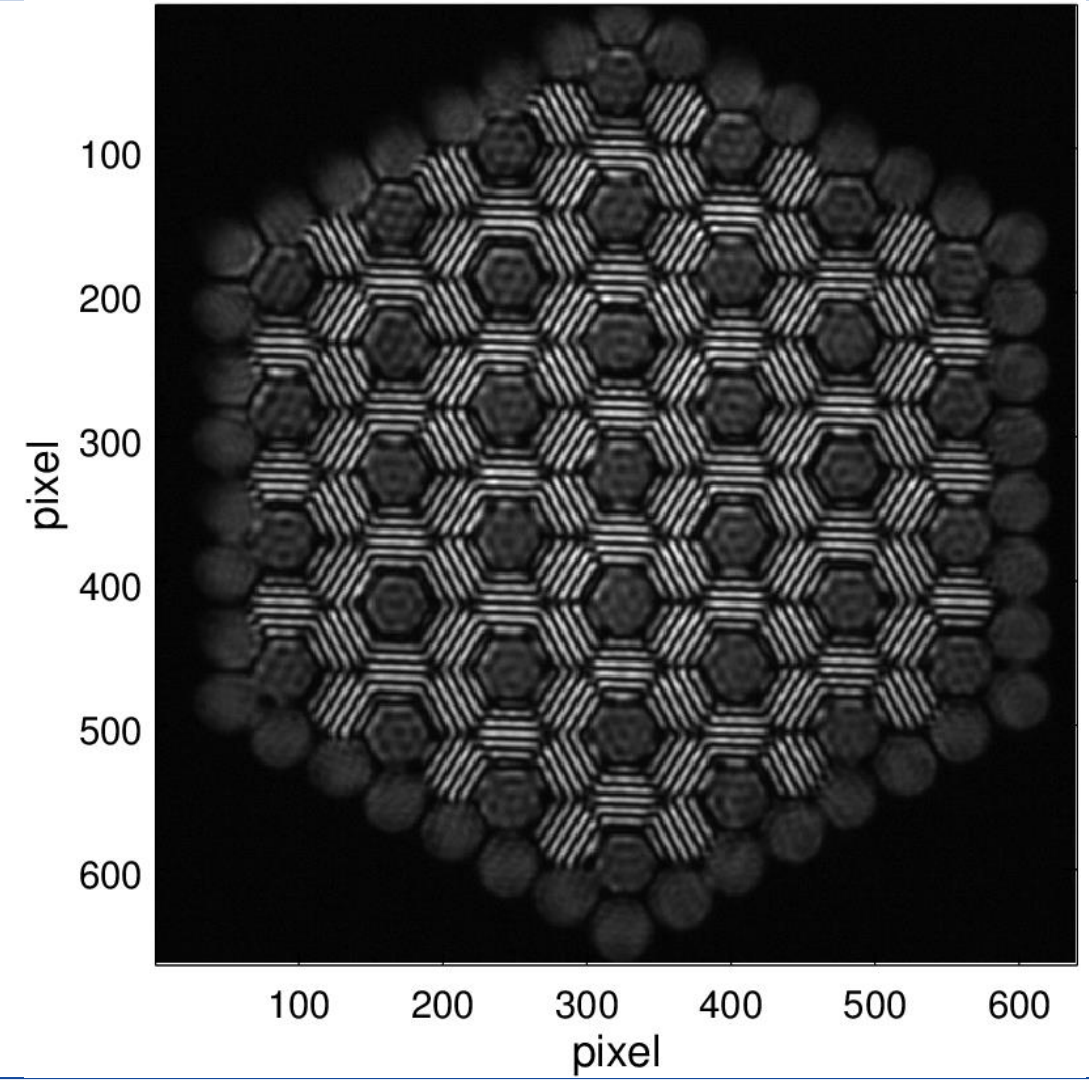
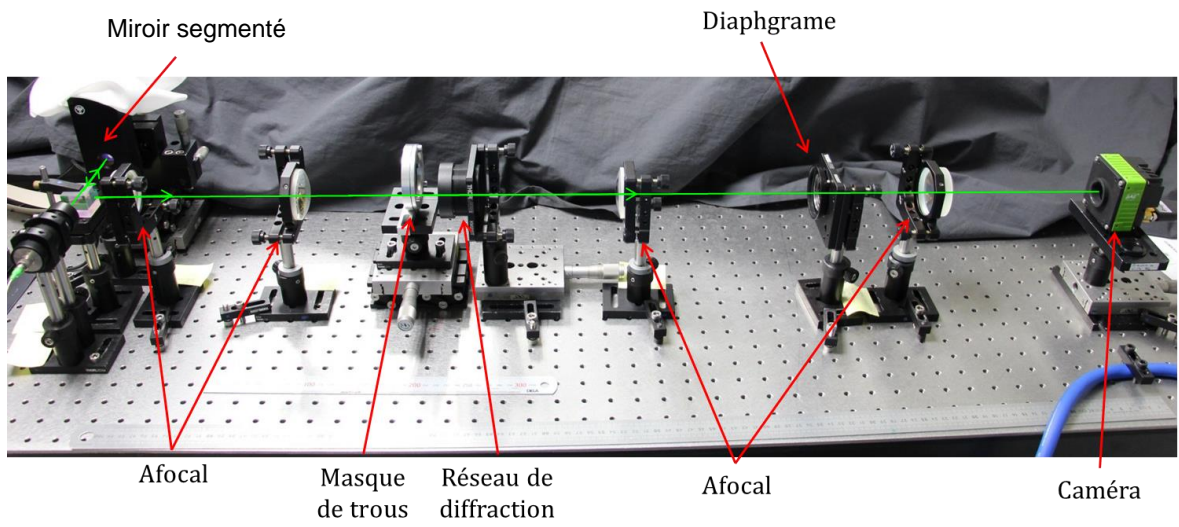
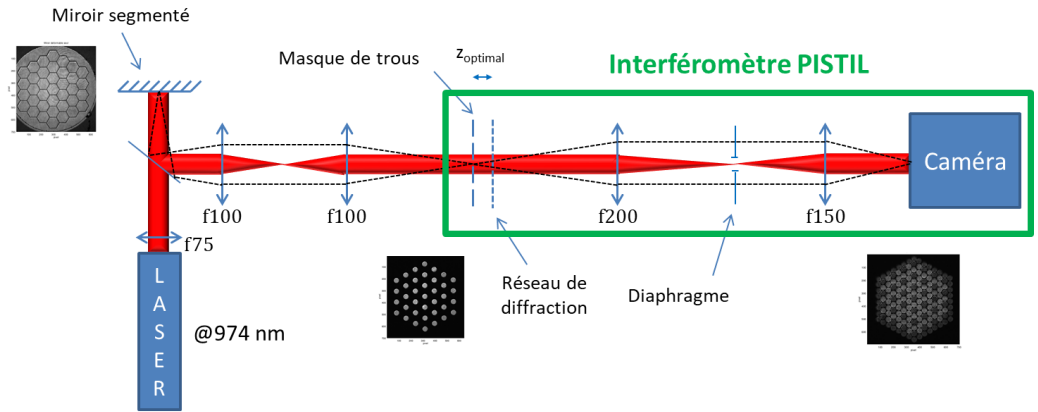
Relations de clôture:

Estimation de l'erreur par la mesure en elle-même

## VALIDATION AU LABORATOIRE

# Validation au laboratoire 1

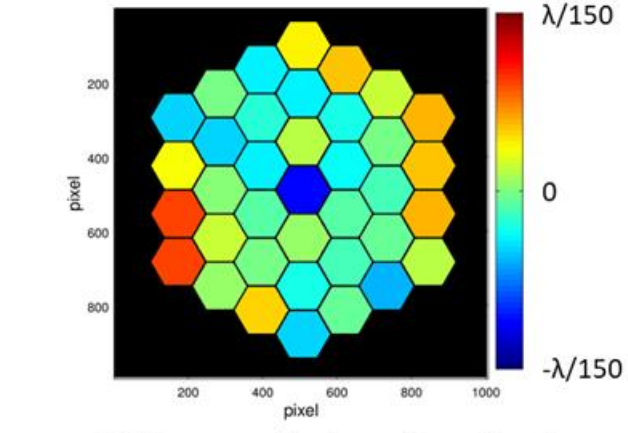
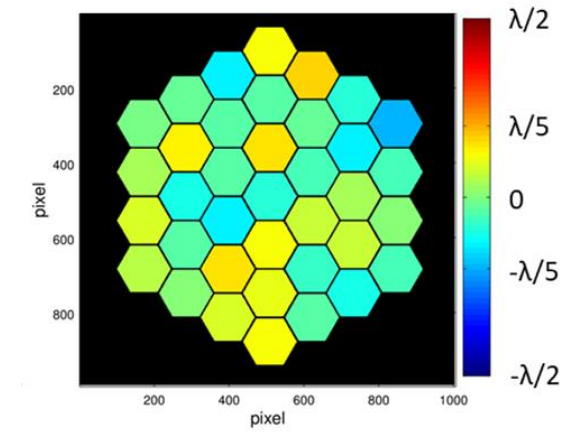
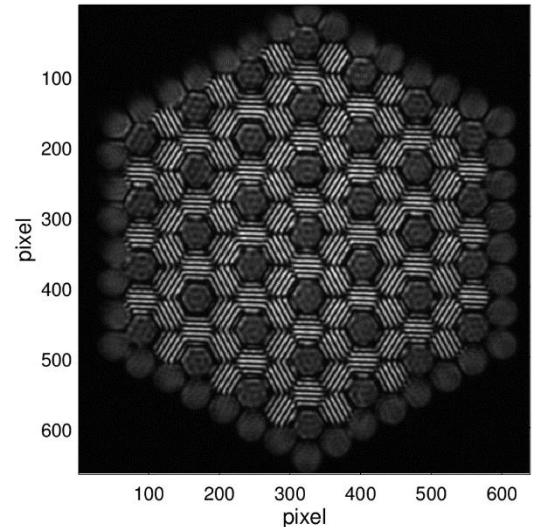
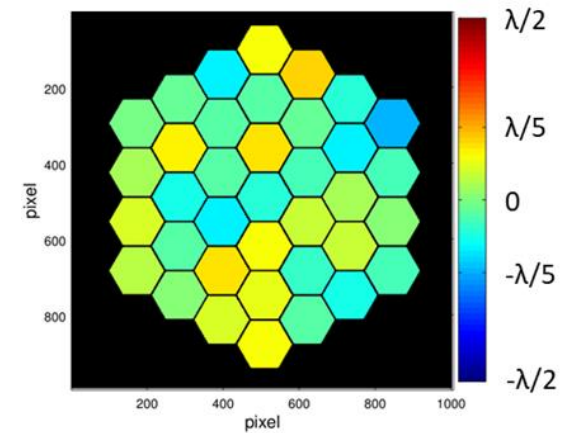
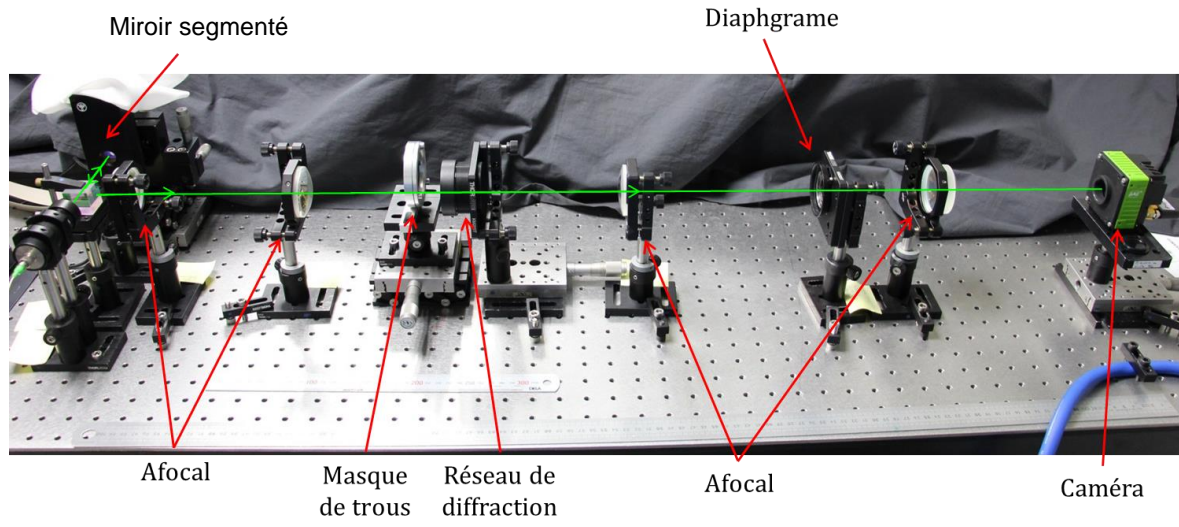
## Sur miroir segmenté, faible dynamique





# Validation au laboratoire 1

## Sur miroir segmenté, faible dynamique



Deprez, et al, Opt. Express, 26(5), 5212-5224, 2018.

## Performances

Sur miroir plan

	Piston (nm rms)		Tip ( $\mu$ rad rms)		Tilt ( $\mu$ rad rms)	
	Interféromètre	Objectif	Interféromètre	Objectif	Interféromètre	Objectif
Résolution	0,18 ( $\lambda/5400$ )	$\lambda/200$	1,85	10	1,79	10
Erreur-type	0,28 ( $\lambda/3500$ )		2,64		3,26	

Mesures du miroir segmenté avec des pistons seulement

➔ Erreur-type moyenne en piston : 2 nm ( $\lambda/500$ )

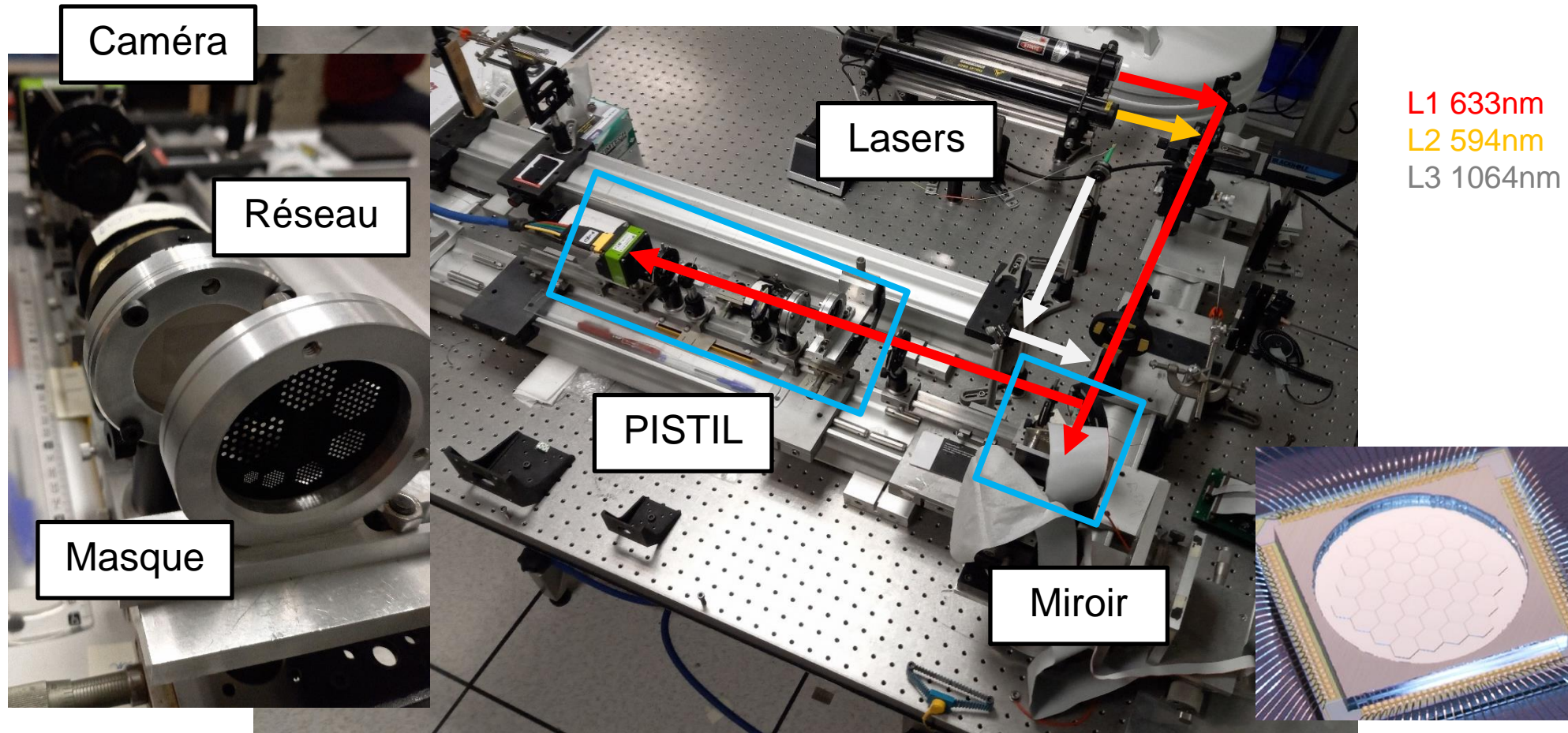
Mesures du miroir segmenté avec des pistons, tips et tilts

➔ Erreur-type moyenne en piston : 5,2 nm ( $\lambda/200$ )

➔ Erreur-type moyenne en tip/tilt : 30  $\mu$ rad

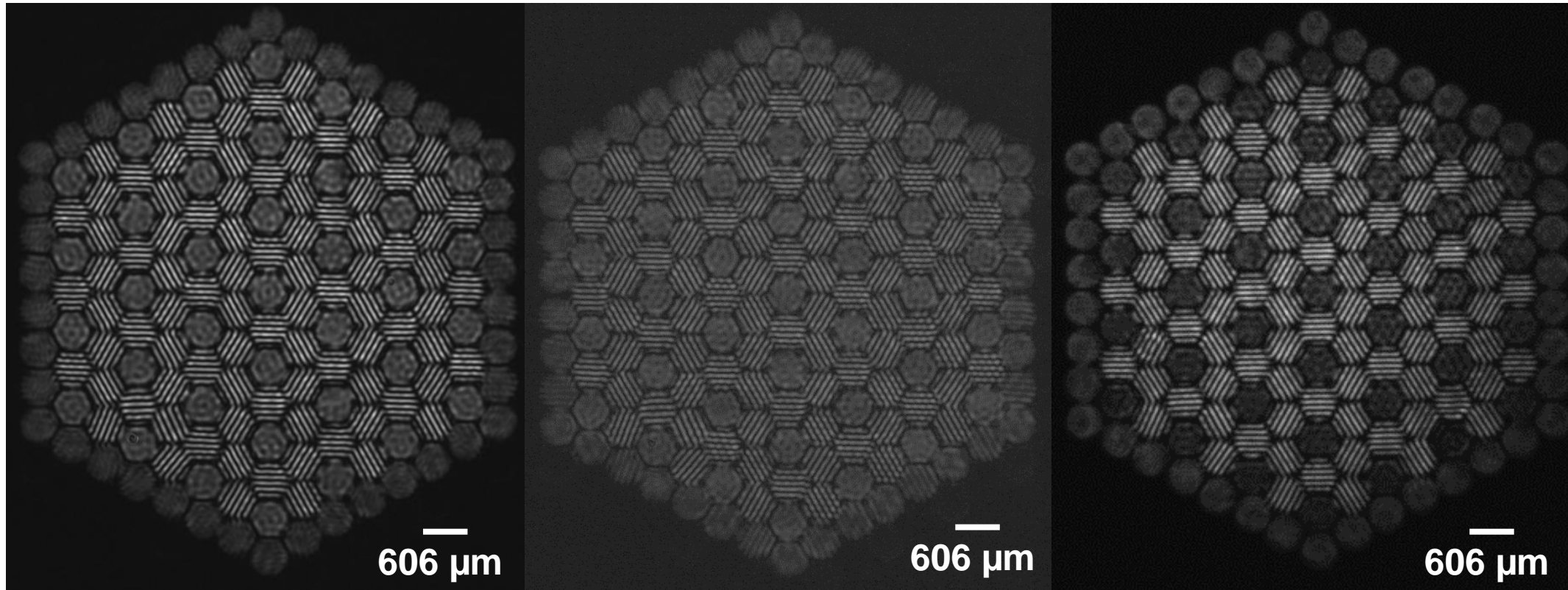
# Validation au laboratoire 2

## Banc Hibiscus



# Validation au laboratoire 2

## Banc Hibiscus : Pistilogrammes expérimentaux



$$\lambda_1 = 633 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 594 \text{ nm}$$

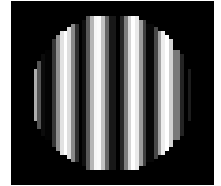
$$\lambda_3 = 1064 \text{ nm}$$

## Sur le banc Hibiscus : problématique des grandes dynamique

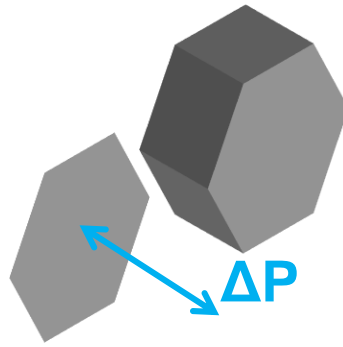
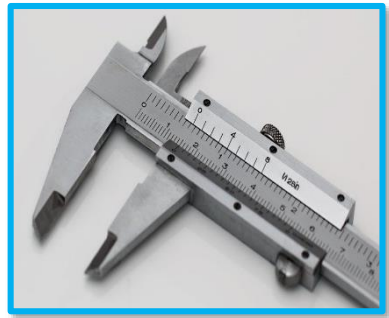


PISTIL → Franges → cosinus → périodique  
Dynamique accessible limitée à  $[-\pi, +\pi[$  ou  $[-\frac{\lambda}{2}, +\frac{\lambda}{2}[$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{5\lambda}{4} =$$



**Solution: Vernier optique**    Mesure avec deux couleurs  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour lever l'ambiguïté.



$$\Delta P = 791 \text{ nm}$$

$\lambda_1$  633nm  
 $\lambda_2$  594nm

$$\Delta P^{\lambda_1} \approx 158 \text{ nm}$$

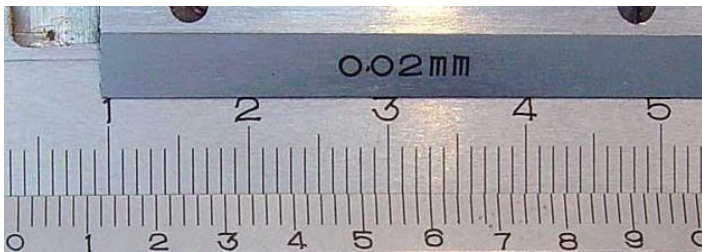
$$\Delta P^{\lambda_2} \approx 197 \text{ nm}$$

$$158 + n \times \lambda_1 \dots$$

$$197 + m \times \lambda_2 \dots$$

$$n = 1 \rightarrow 791 \text{ nm}$$

$$m = 1 \rightarrow 791 \text{ nm}$$



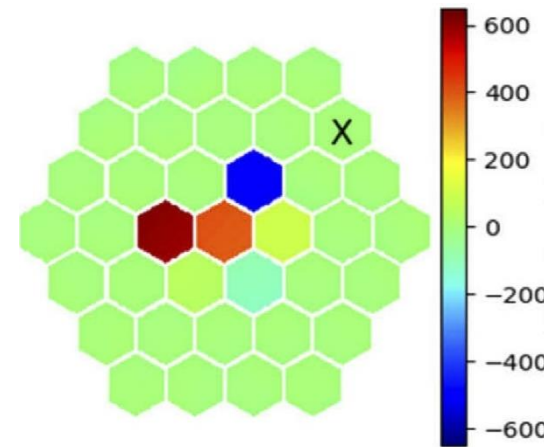
## Sur le banc Hibiscus, mesure à grande dynamique

Mesure en double aveugle :

- un motif de référence sur un même miroir segmenté
- deux techniques de mesures très différentes (PISTIL vs Phase Shifting Interferometry)
- confrontation des résultats

Exemple:  
« îlot des phases »

Grands pistons  
( $> 350$  nm) au centre



Rouze et al, Opt. Express 28, 32415-32425 (2020)

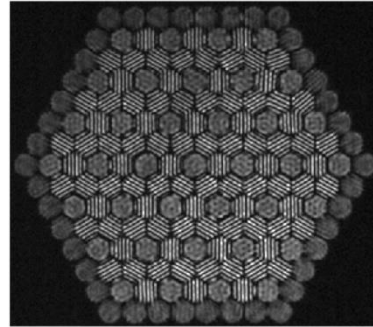
# Validation au laboratoire 2

## Sur le banc Hibiscus, mesure à grande dynamique

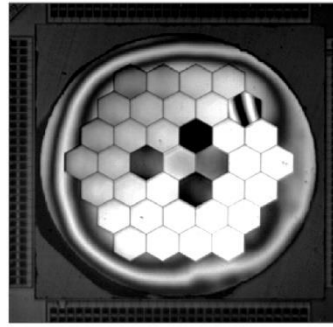
Exemple:  
« îlot des phases »

Mesures PISTIL →  
(633nm et 594nm)

Pistilogram @ 633nm



Interferometric Fringes @ 650nm



← Mesures LAM sur le PSI  
(650nm)



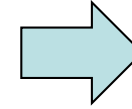
Mêmes valeurs à une  
justesse moyenne  
relative de  $\lambda/100$   
( $< 10$  nm ou 0,06 rad)

Rouze et al, Opt. Express 28, 32415-32425 (2020)

## LES APPLICATIONS

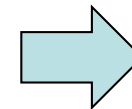


Diagnostic métrologique de la qualité  
de mise en phase pour les lasers CBC



**Présentation B. Rouzé**  
**Session 2 – 15h**

Vers le contrôle commande



**Poster T. Rousseaux**

---

**Merci de votre attention**

# Session 1: Les fondamentaux

*Chairman : Jérôme Primot*

- *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes. Jean-Christophe Chanteloup, LULI*
- *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope. Serge Monneret, Institut Fresnel*
- *PISTIL, Cindy Bellanger, ONERA*
- *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X. Adrien Stolidi, CEA*



list

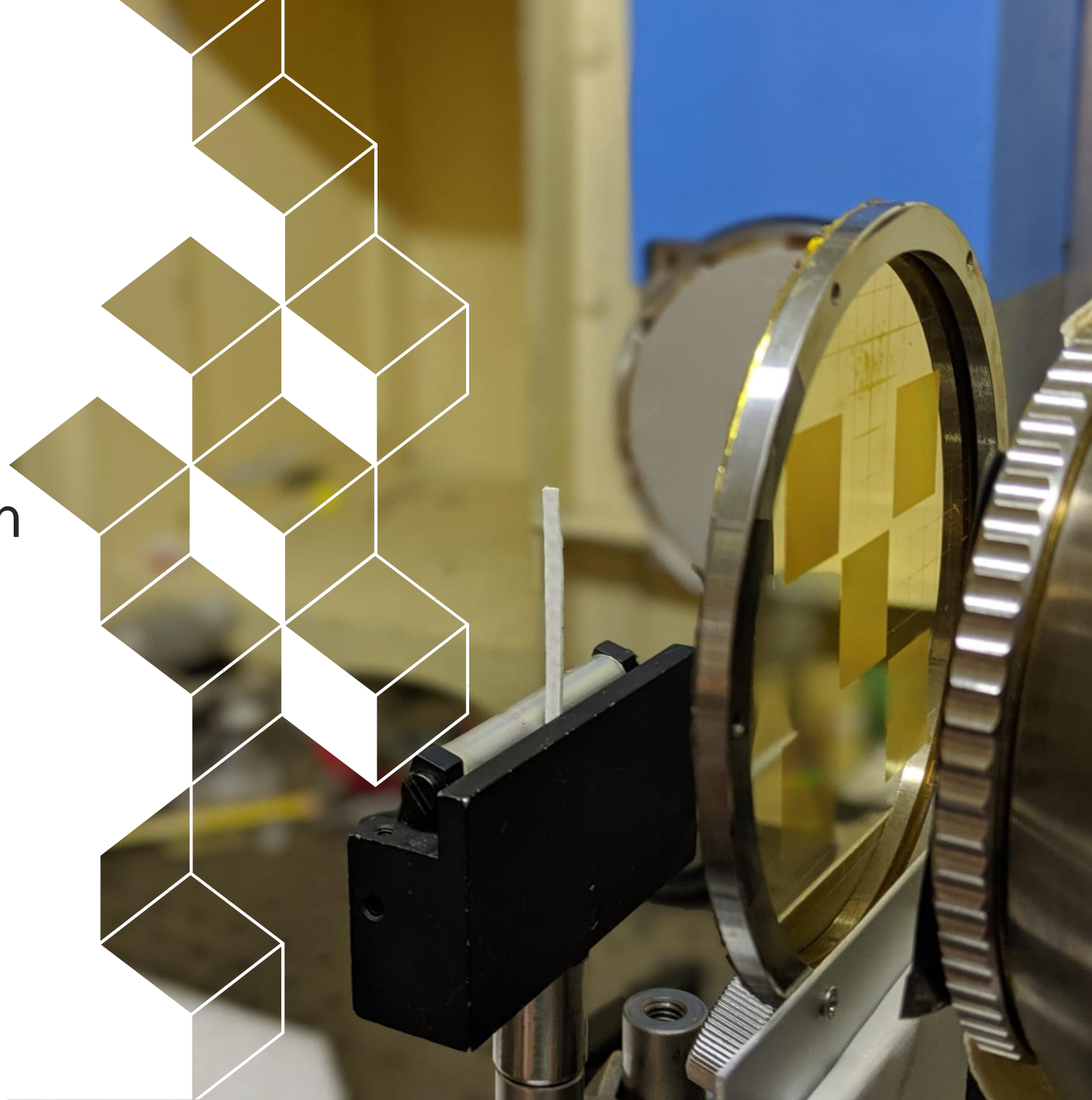
# Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X

Adrien Stolidi



1<sup>ère</sup> Rencontre d'Interférométrie à Décalage MultiLatéral

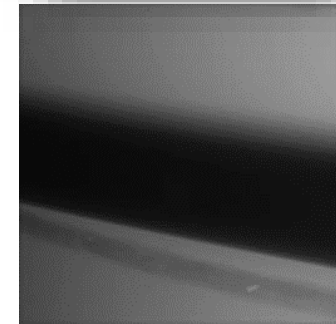
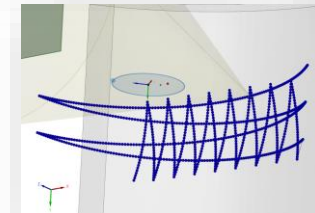
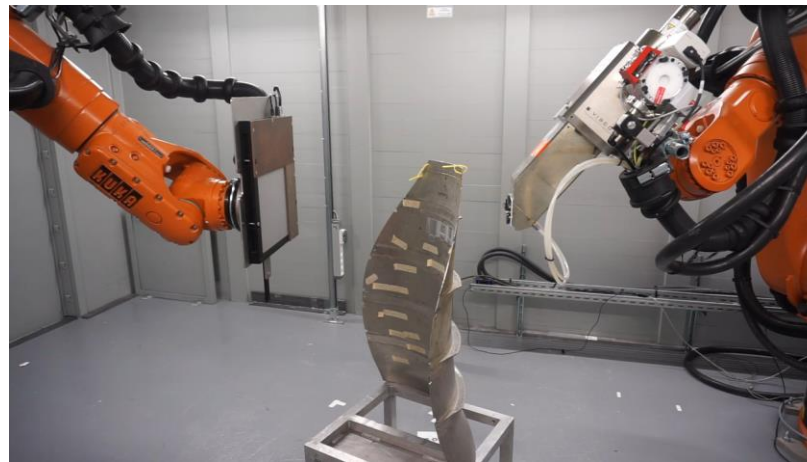
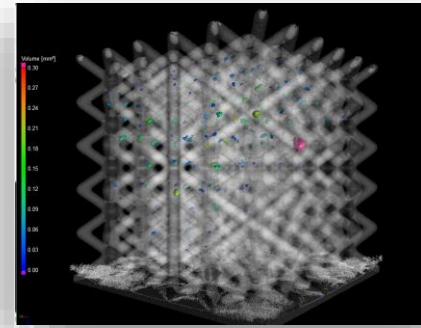
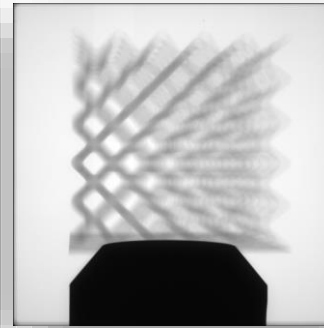
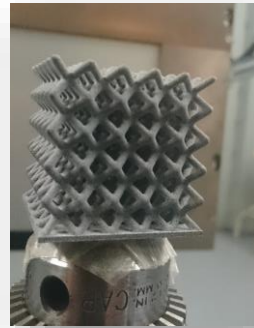
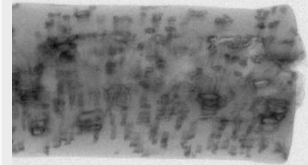
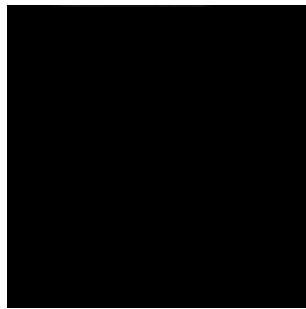
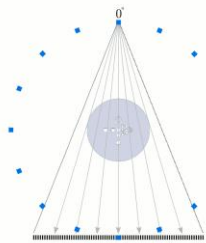
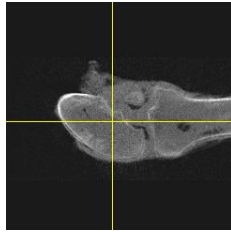
11 & 12 Mai | CEA Saclay



# L'imagerie par rayons X



Röntgen (1895)

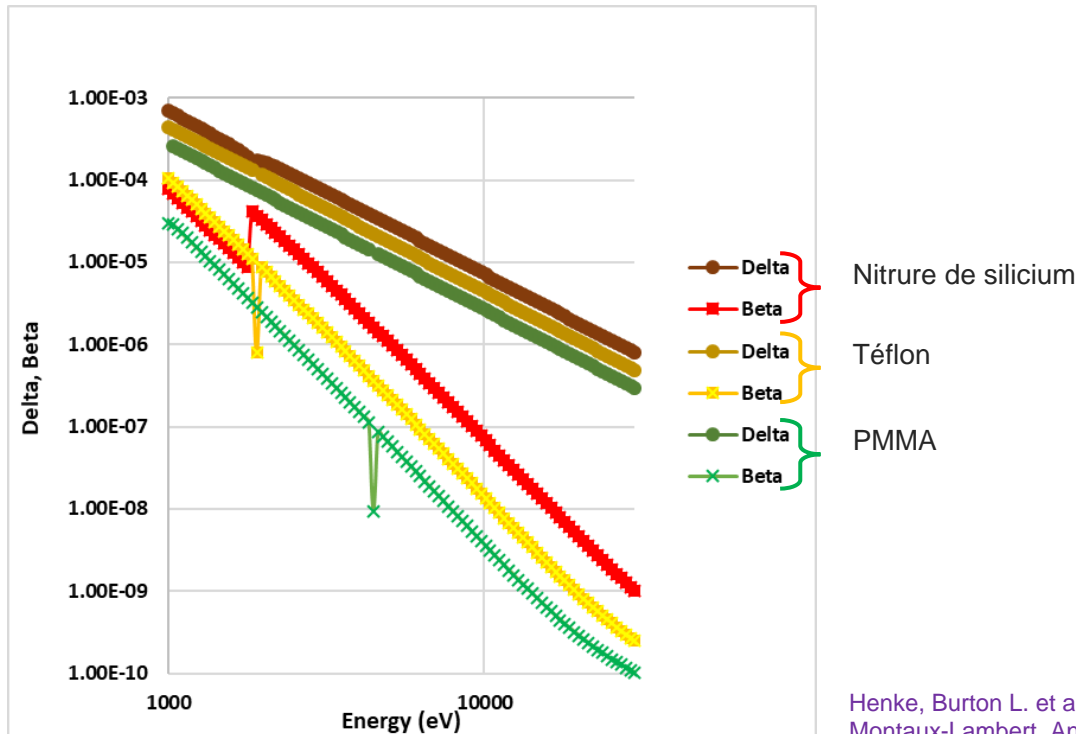


# Les Rayons X : Quelques repères

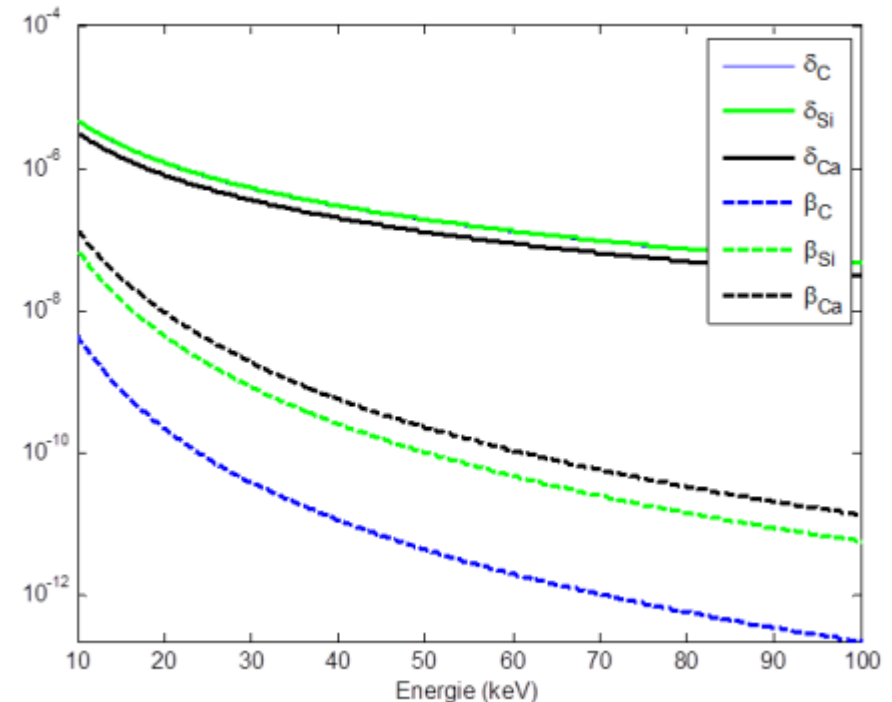
- On se place dans une gamme où les photons ont des énergies de :
  - Quelques keV à plusieurs centaines de keV
  - Soit des longueurs d'onde autour du nanomètre jusqu'à  $10^{-3}$  nanomètre
  - Soit des fréquences [ $10^{11}$  –  $10^{14}$ ] MHz

- Dans cette gamme et pour tous matériaux, l'indice de réfraction complexe est proche de l'unité et  $<1$ . Les valeurs faibles du décrément donne des angles de déflexion faible ( $\sim \mu\text{rad}$ )

$$n = 1 - \delta(\mathbf{r}) + i\beta(\mathbf{r})$$



Henke, Burton L. et al (1993)  
Montaux-Lambert, Antoine (2017)

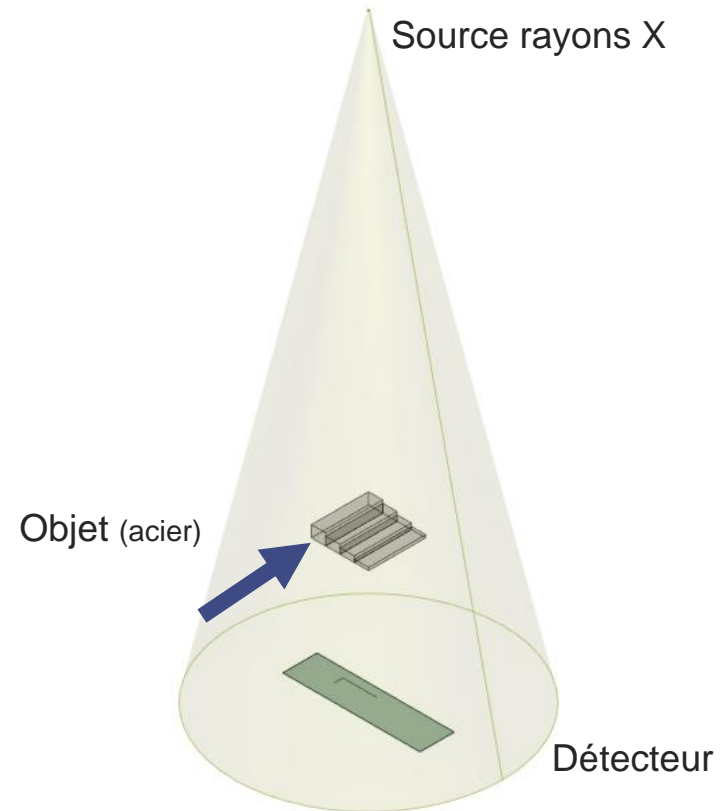
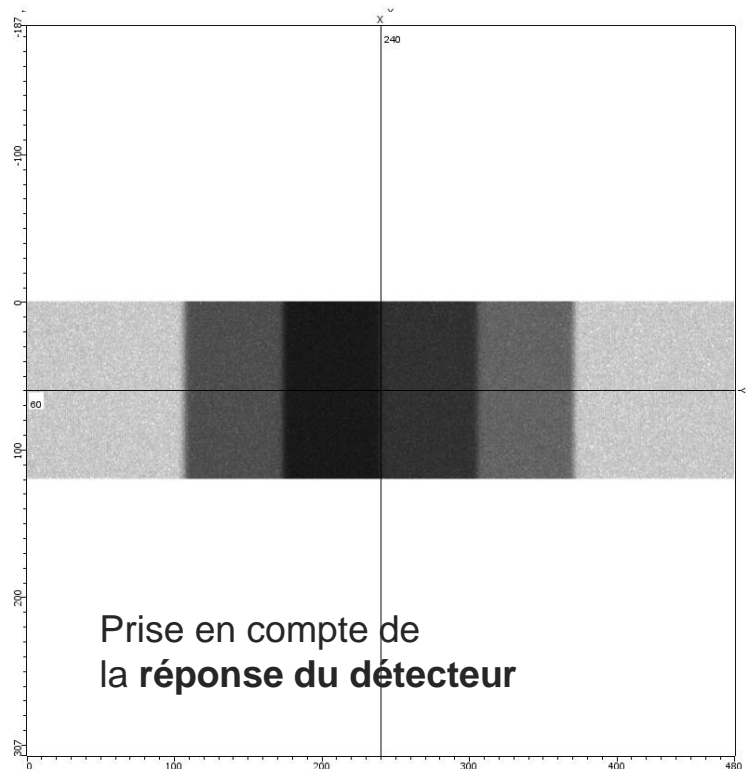


# Imagerie par Rayons X : Utilisation partielle du front d'onde ?

## Comment se forme une image ?

### ➤ Point de vue corpusculaire

- Loi de Beer Lambert 
$$N_{\gamma} = N_{\gamma_0} \exp \left[ - \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \rho E p \right]$$



# Imagerie par Rayons X : Utilisation partielle du front d'onde ?

## Comment se forme une image ?

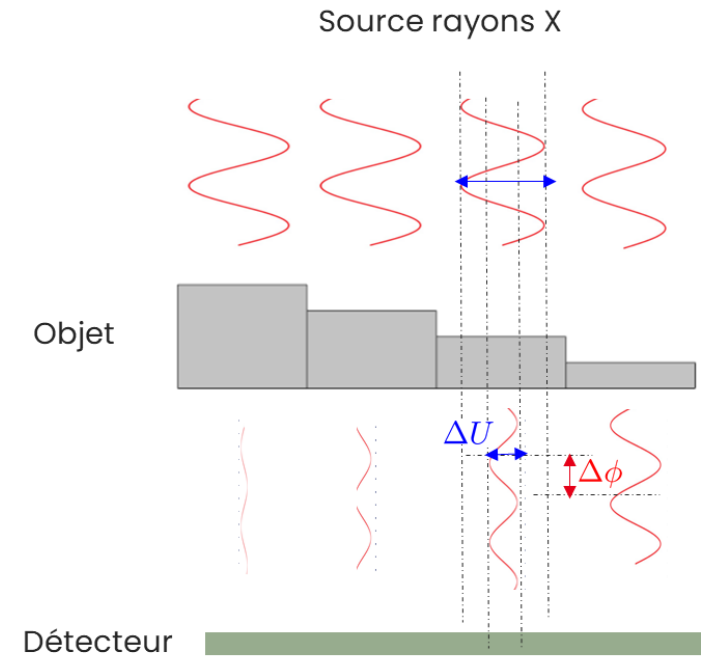
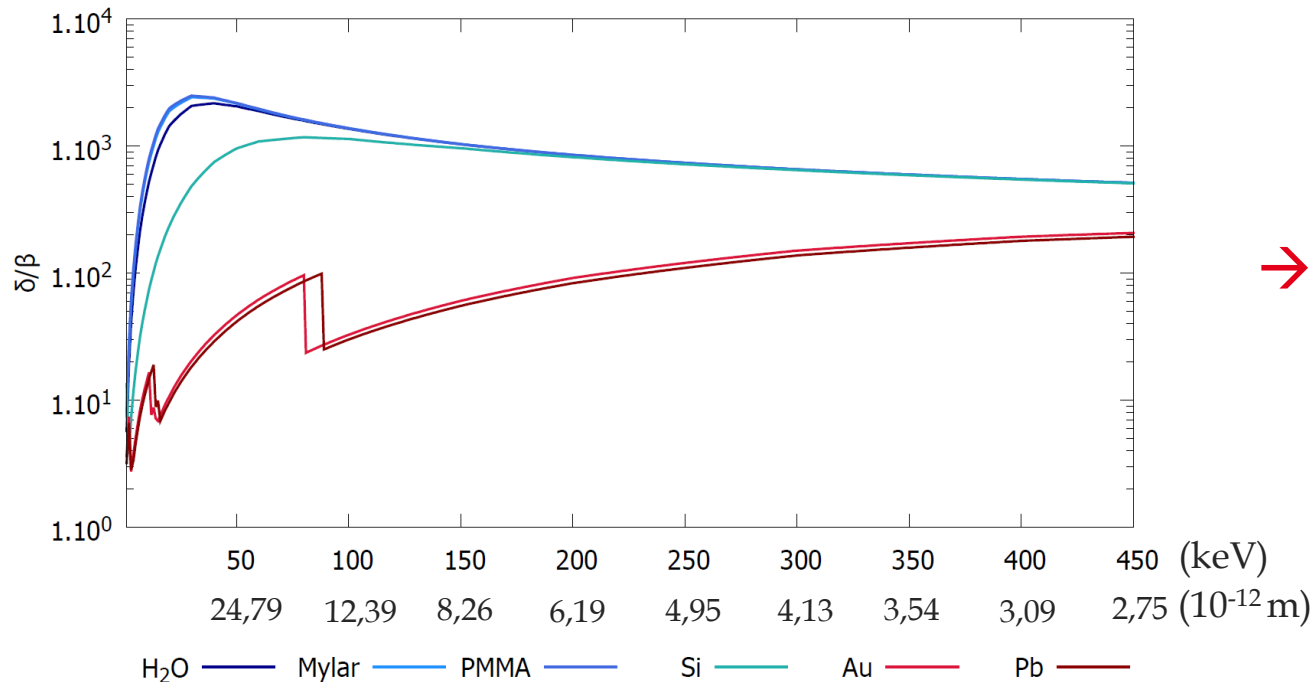
### ➤ Point de vue ondulatoire

- Soit une onde transmise d'amplitude et phase

$$T(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}) \times e^{i\phi(\mathbf{r})}$$

$$U(\mathbf{r}) = \exp \left[ -\frac{2\pi}{\lambda} \int \beta(\mathbf{r}) dz \right] \quad \beta(\mathbf{r}) = \frac{\lambda}{4\pi} \mu$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{2\pi}{\lambda} \int (1 - \delta(\mathbf{r})) dz \quad n = 1 - \delta(\mathbf{r}) + i\beta(\mathbf{r})$$

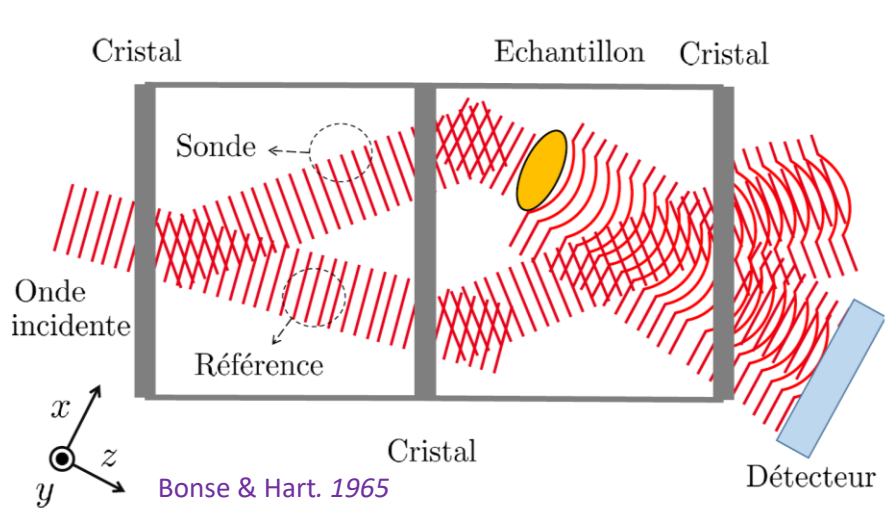


➔ Intérêt de venir compléter l'information en atténuation avec une information de phase

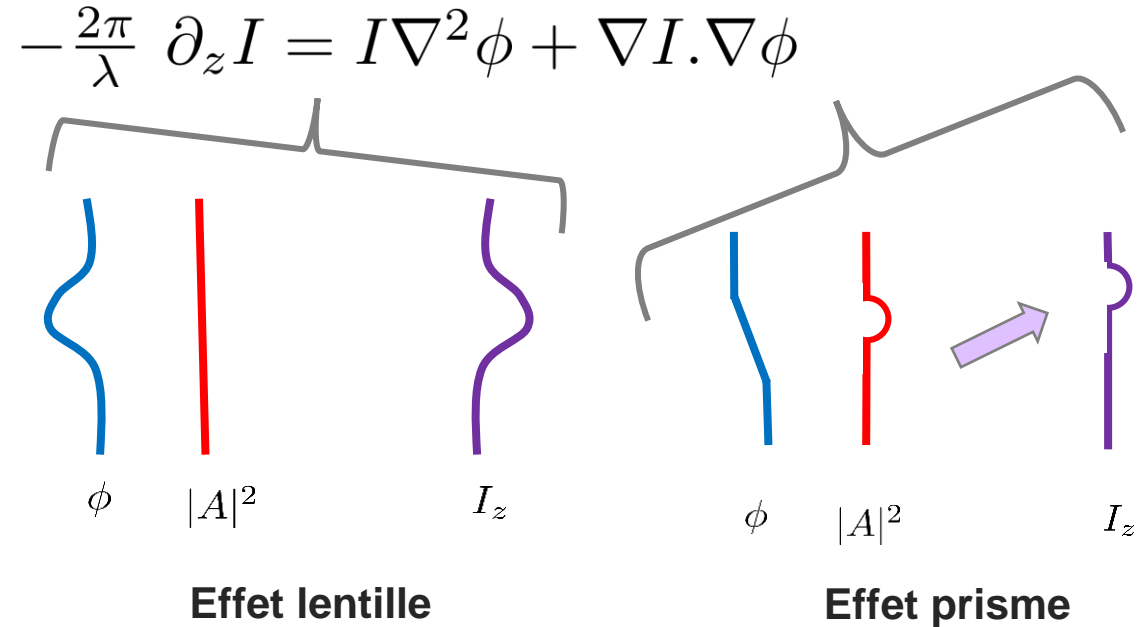


# Comment extraire la phase

# de manière pratique



Mesure de déphasage sur source synchrotron (forte cohérence)



- Mettre en exergue l'**effet lentille** ou **prisme** pour extraire une information de **phase**
- **MAIS** en intégrant des **contraintes** inhérentes des différentes **sources** à rayons X et des systèmes de **détections**

# Rayons X : l'Instrumentation



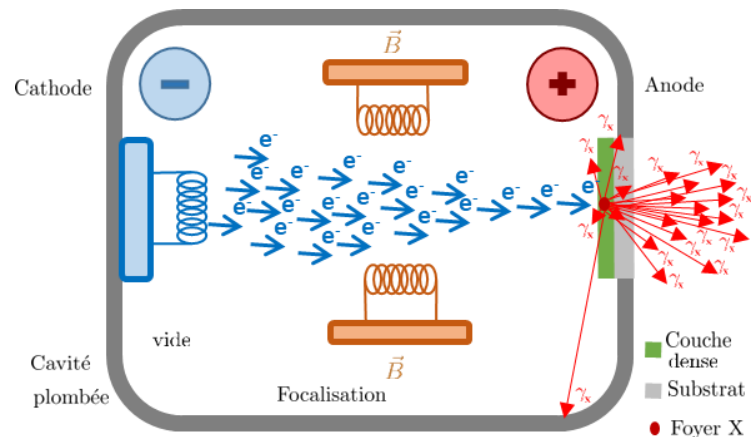
## Les sources

### Tube à rayons X

- Portabilité
- Flux : au détriment de la taille du foyer RX
- Cohérence ?  
Spatiale (Temporel pas vraiment) au détriment du flux

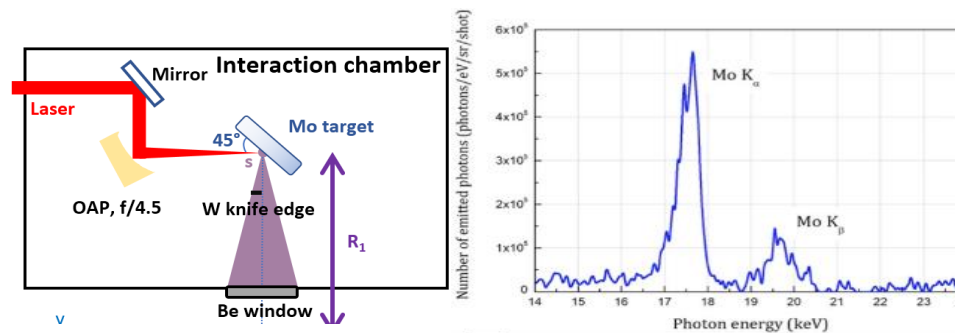


Tube à rayons X  
μ-foyer ( $\varnothing \sim 5\mu\text{m}$ )



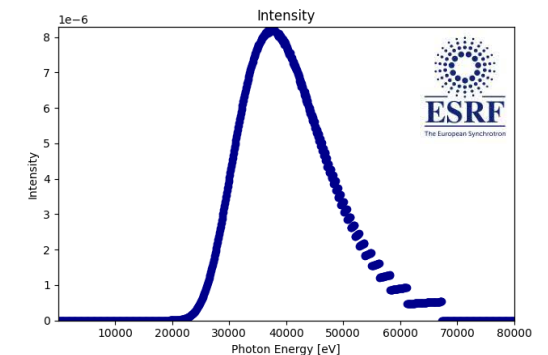
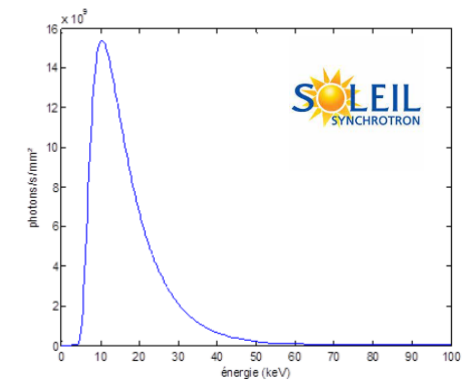
### Source rayons X laser-plasma

- Cohérence
- Source impulsionnel
- Compromis entre tube et synchrotron



### Source Synchrotron

- Flux
- Cohérence
- Empiètement

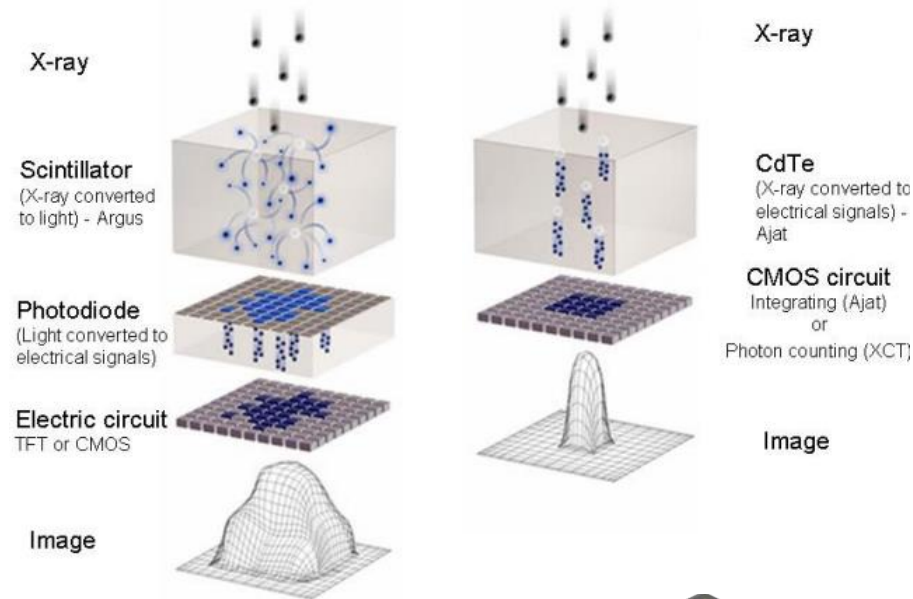


# Rayons X : l'Instrumentation

## Les détecteurs

- Très haute résolution
- Stabilité & débit de dose
- Simplicité des traitements
- Haute cadence

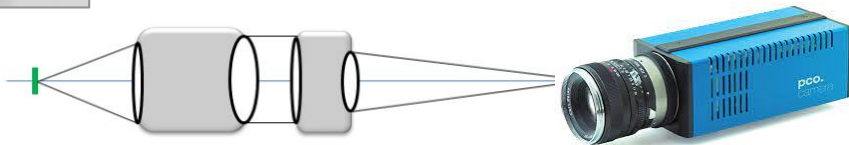
### Détection indirecte & Détection directe



- Pas de bruit électronique
- Gain en résolution spatiale à taille de pixel donnée
- Résolution spectrale

Pixel 6,5  $\mu\text{m}$   
Surface 1,3x1,3 cm

Pixel 200  $\mu\text{m}$   
Surface 40x40 cm



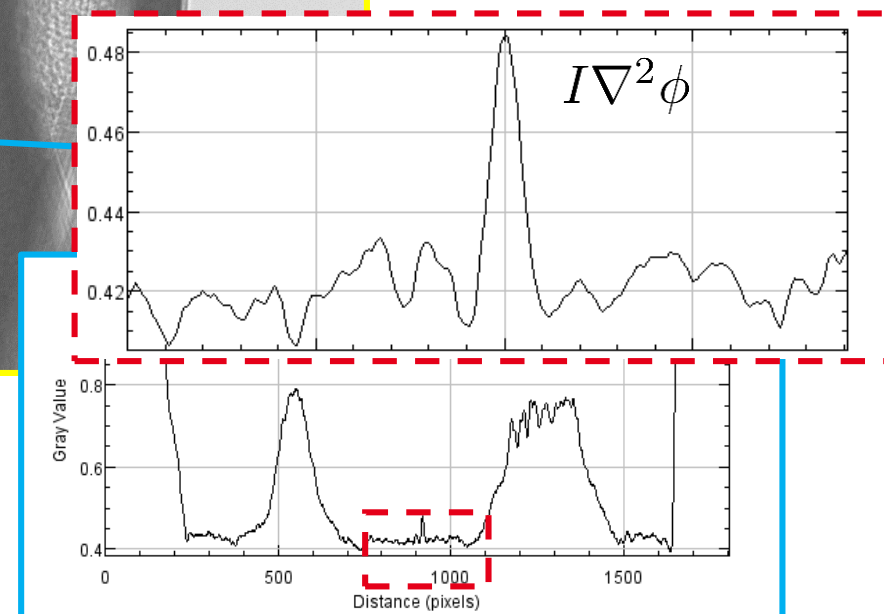
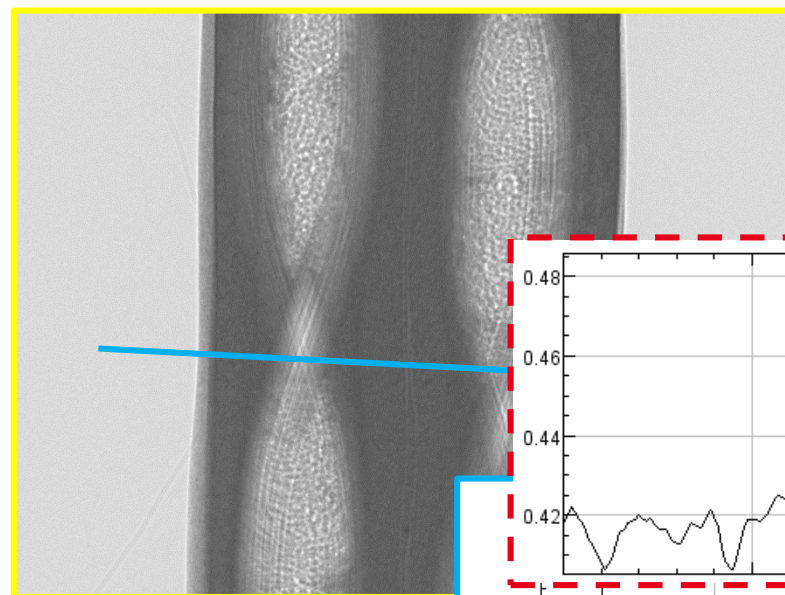
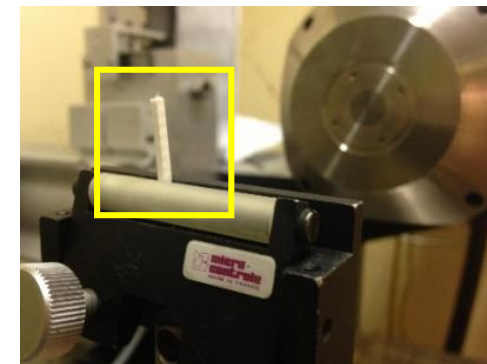
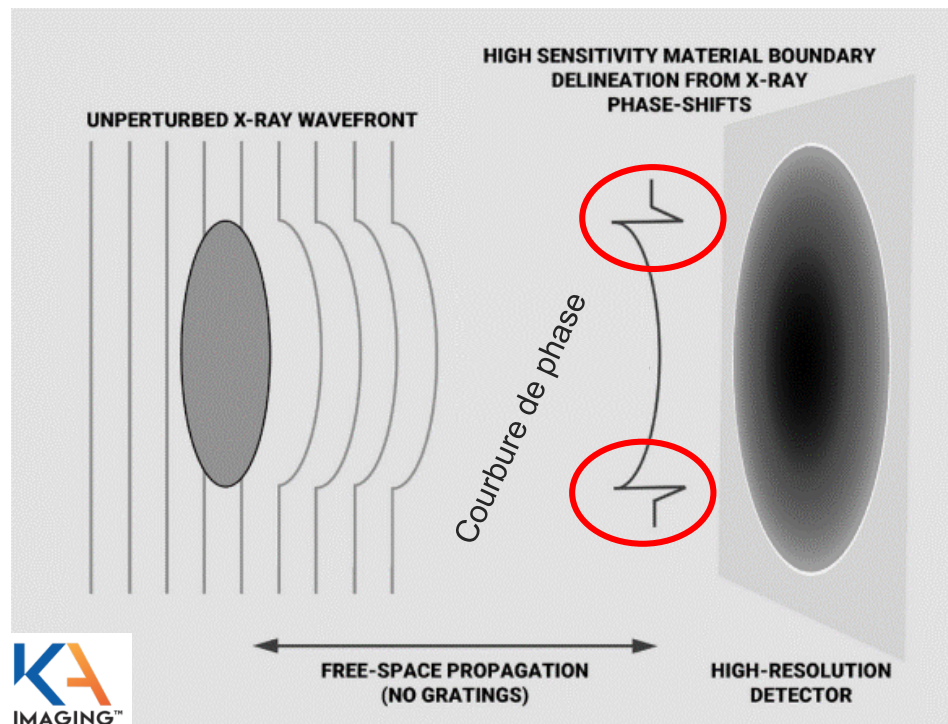
Pixel 55  $\mu\text{m}$   
Surface 2,8 x 7 cm



Pixel 126  $\mu\text{m}$   
Surface 7,5x1,5 cm

# Comment extraire la phase de manière pratique ?

$$-\frac{2\pi}{\lambda} \partial_z I = I \nabla^2 \phi + \nabla I \cdot \nabla \phi$$

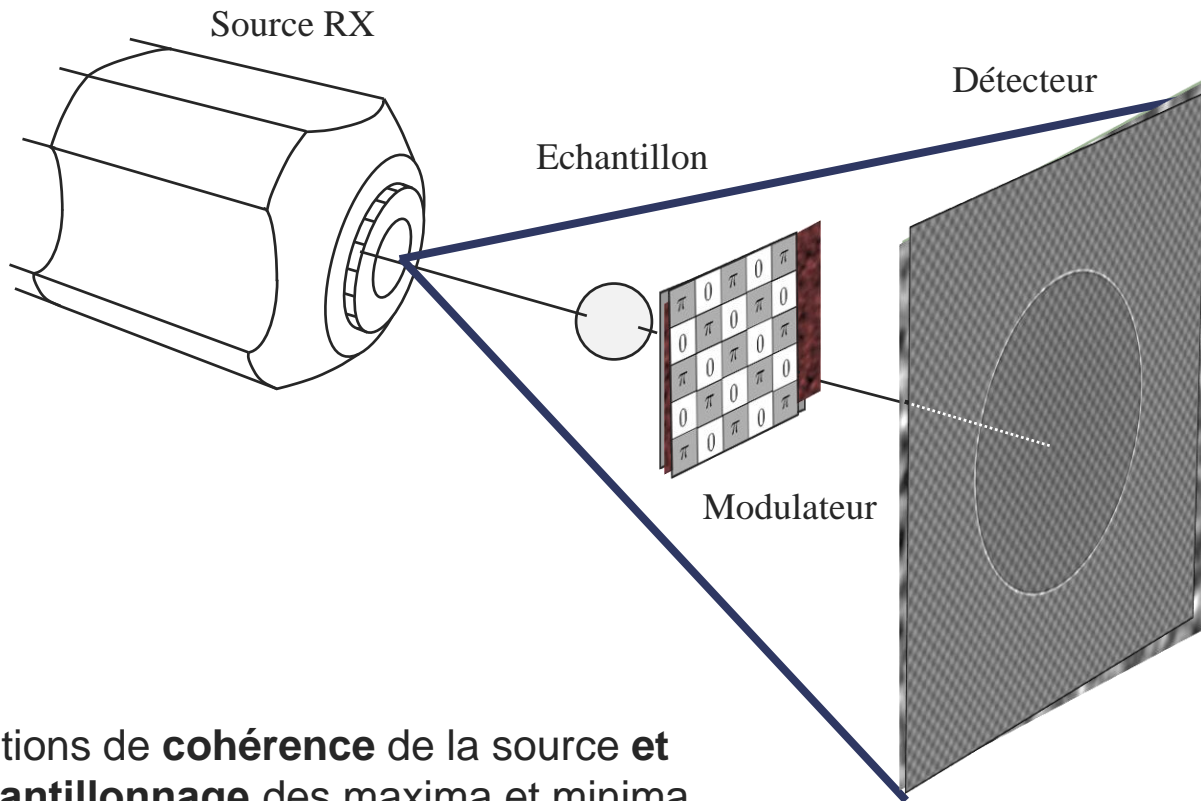


- Conditions de détection de la courbure lié à la **cohérence** de la source et la **distance de propagation** pour échantillonner la courbure de phase

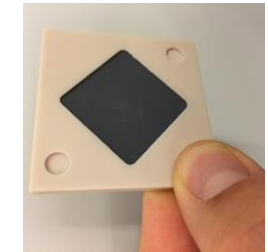
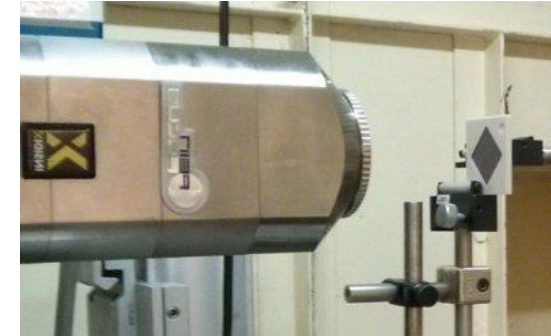
$$l_s = \frac{\lambda d_{so}}{2\pi s} \quad d_{od} \ll \frac{s^2}{\lambda}$$

# Comment extraire la phase de manière pratique ?

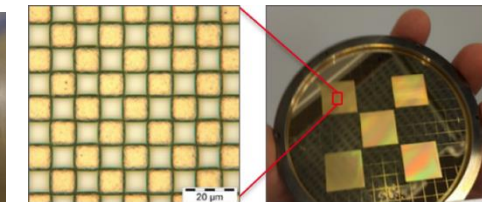
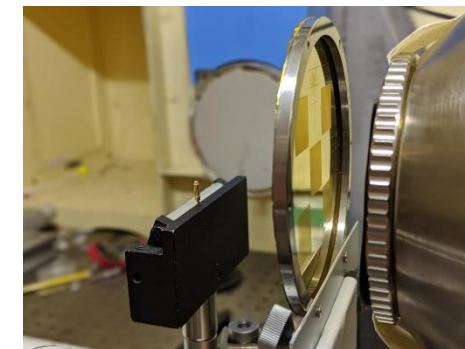
$$-\frac{2\pi}{\lambda} \partial_z I = I \nabla^2 \phi + \nabla I \cdot \nabla \phi$$



- Conditions de **cohérence** de la source et d'**échantillonnage** des maxima et minima d'intensité



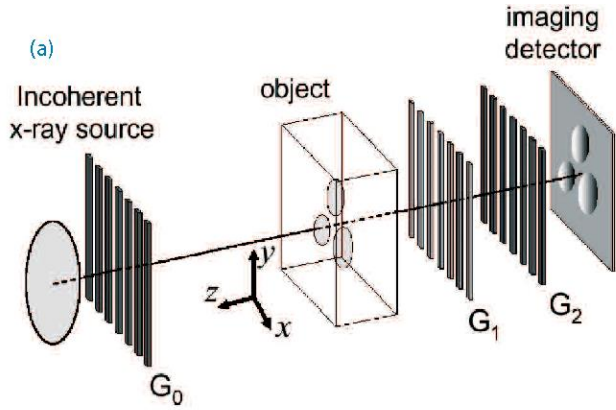
*Speckle based*  
➔ Poster de Clara Magnin



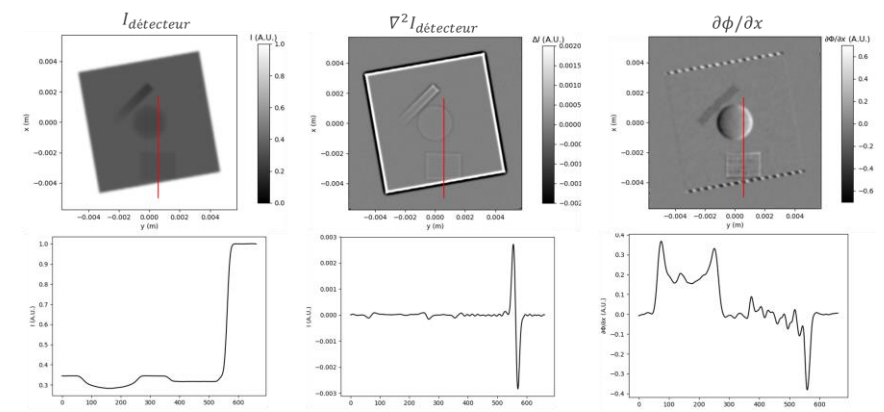
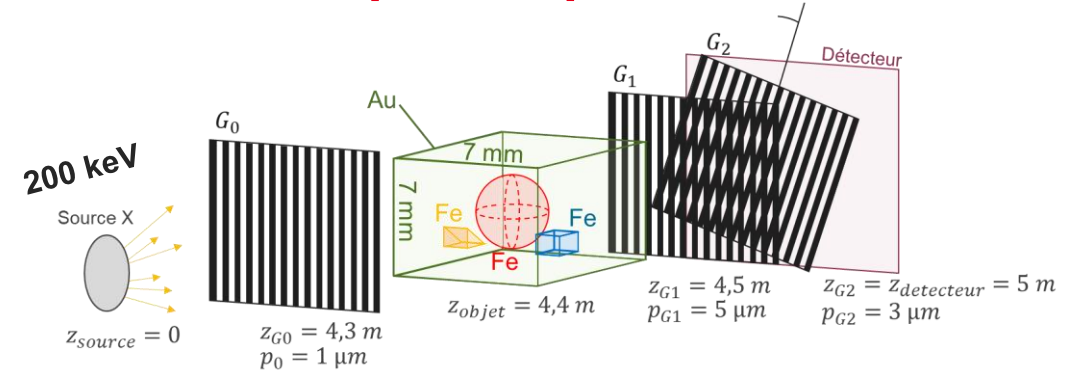
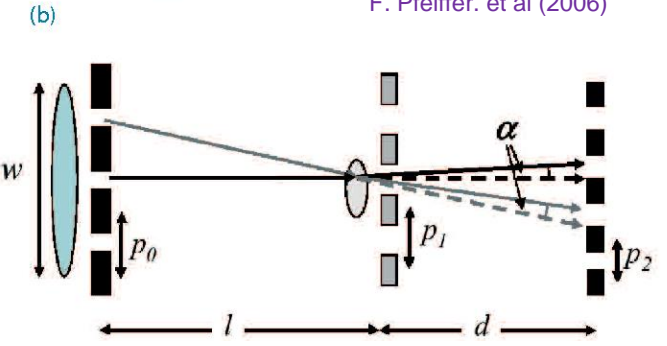
*Single grating*

# Comment extraire la phase de manière pratique ?

$$-\frac{2\pi}{\lambda} \partial_z I = I \nabla^2 \phi + \nabla I \cdot \nabla \phi$$



F. Pfeiffer. et al (2006)

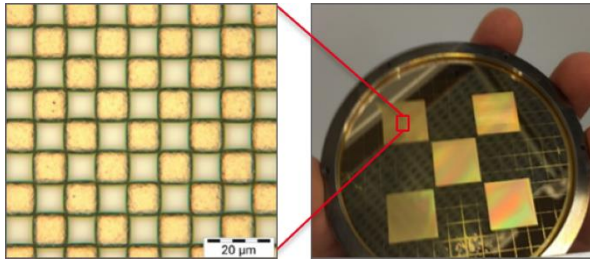


→ Poster de Maxime Bouvier

- Relâcher la condition de **cohérence** par l'ajout d'un masque G0 ainsi que la condition d'**échantillonnage** par l'ajout d'un réseau de lecture (masque d'absorption G2) induisant des franges de Moirés plus facilement échantillonnable

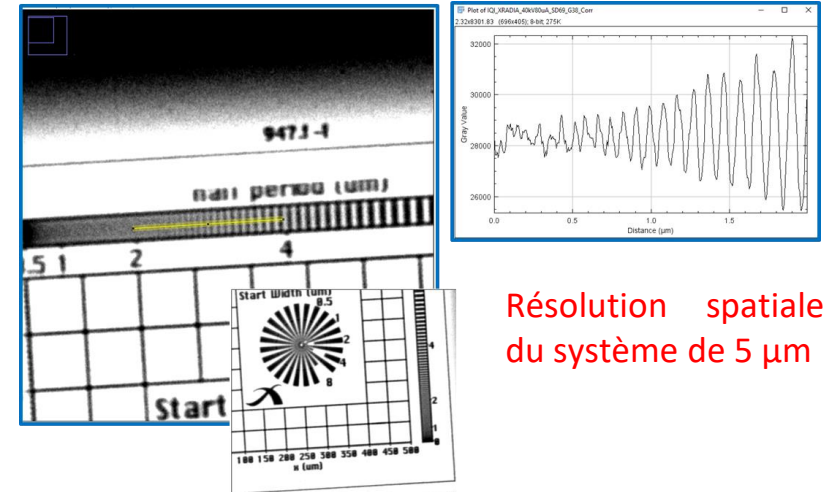
# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Application sur tube à rayons X

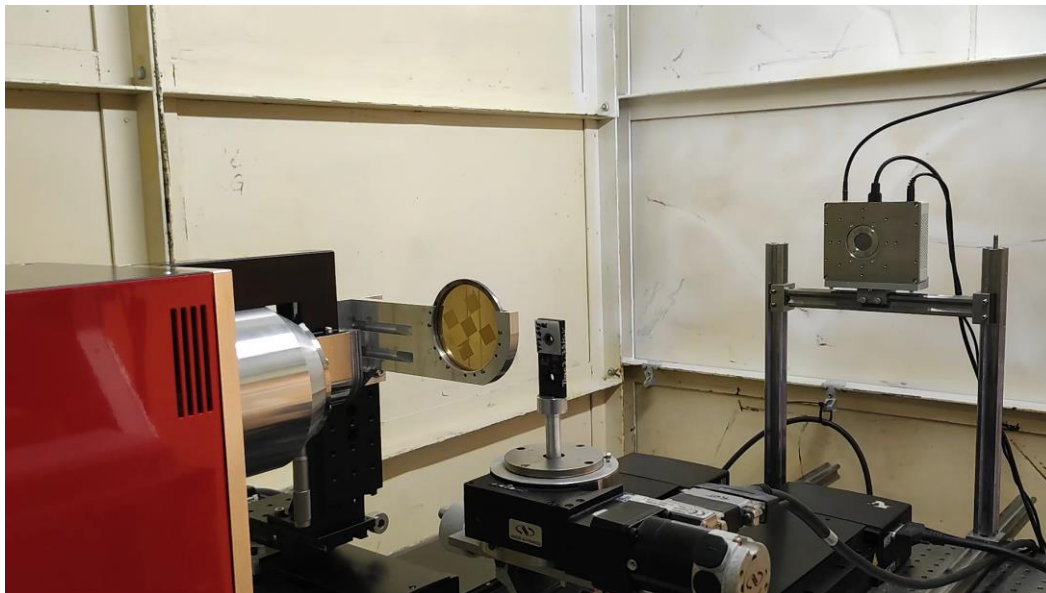


### Grille à 2 niveaux 0- $\pi$

- Période  $p = 12 \mu\text{m}$
- Epaisseur  $e = 3,49 \mu\text{m}$
- Matériau :  $\text{Au}^{79}$



Résolution spatiale  
du système de 5  $\mu\text{m}$



### Tube Hamamatsu *L9181-02* :

- Tension max : 130 kV
- Courant max : 300  $\mu\text{A}$
- Taille de foyer : 5  $\mu\text{m}$  à 4W



### Détecteur Hamamatsu *C12849-101U* :

- Résolution : 2048 \* 2048 pixels
- taille pixel :  $d_{pix} = 6.25 \mu\text{m}$
- Champ de vue :  $\varnothing_d = 1.28 \text{ cm} * 1.28 \text{ cm}$
- Scintillateur Gadox :  $e = 10 \mu\text{m}$

# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Grille d'interférence : 4 ordres vs 5 ordres

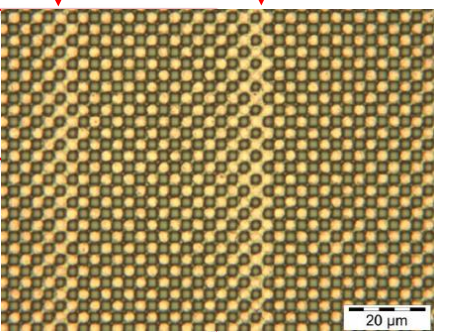
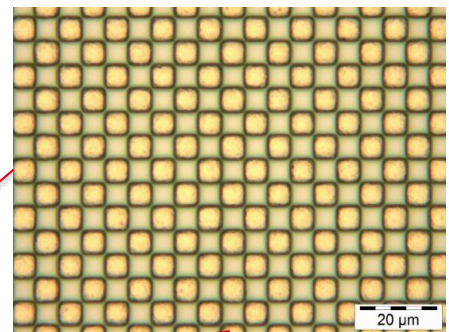
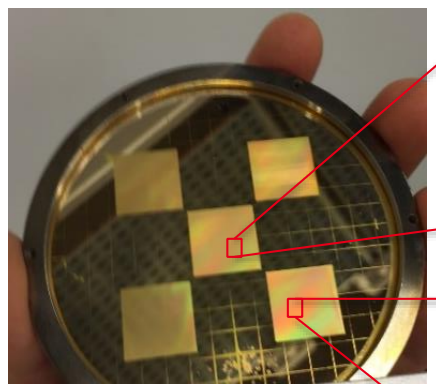


Plot d'or



Epaisseur : 3,49  $\mu\text{m}$  induisant un déphasage 0- $\pi$  à 17,48 keV  
Epaisseur : 7  $\mu\text{m}$

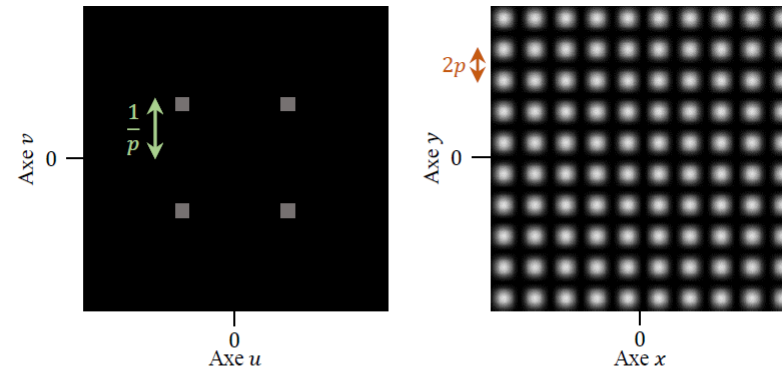
Membrane de polymère



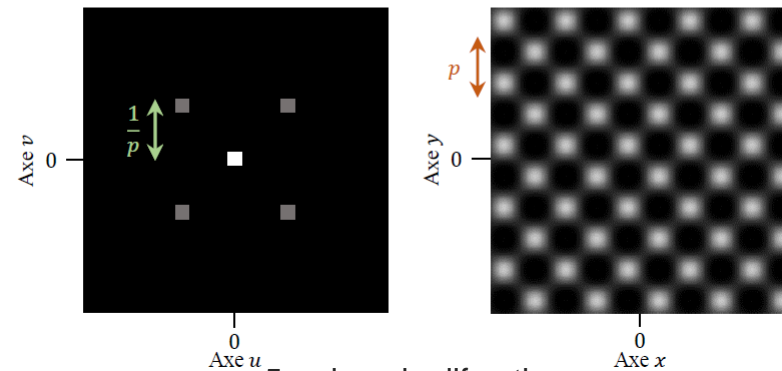
Tailles de plots :

- 3 x 3  $\mu\text{m}^2$     6 x 6  $\mu\text{m}^2$
- 8 x 8  $\mu\text{m}^2$     10 x 10  $\mu\text{m}^2$
- 12 x 12  $\mu\text{m}^2$

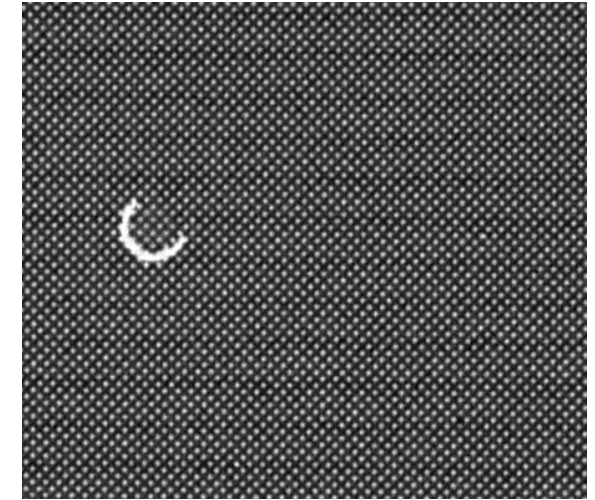
4 ordres de diffractions



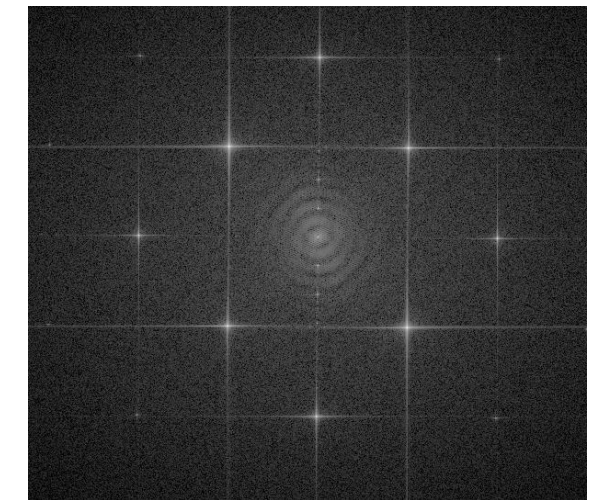
5 ordres de diffractions



Interferogramme  
Plot 8  $\mu\text{m}$  40kV 40 $\mu\text{A}$



TF Interferogramme

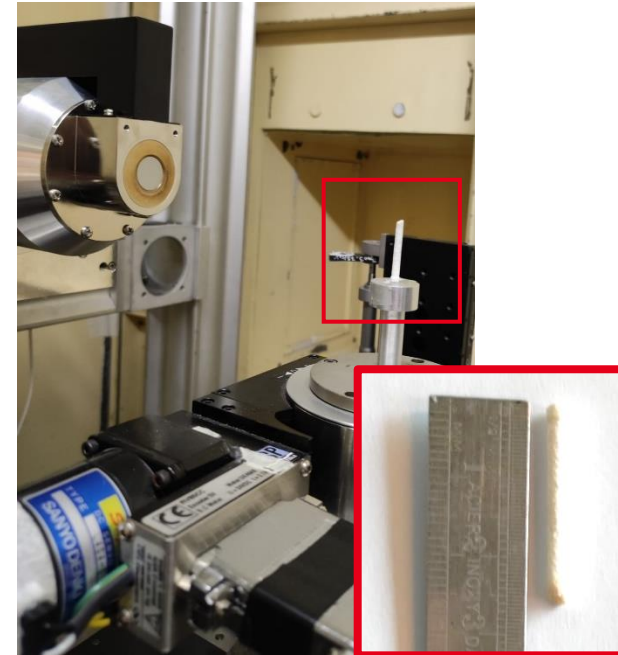
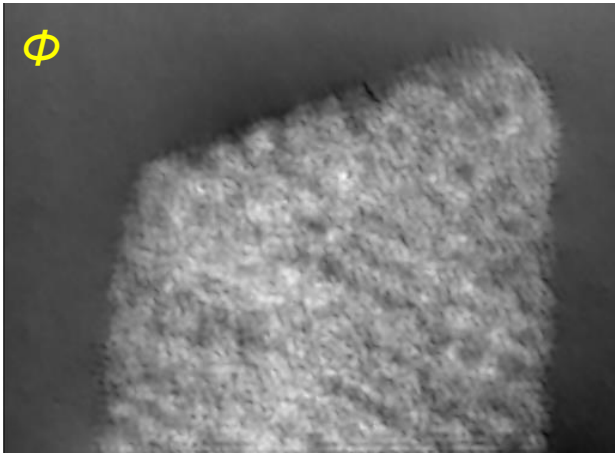
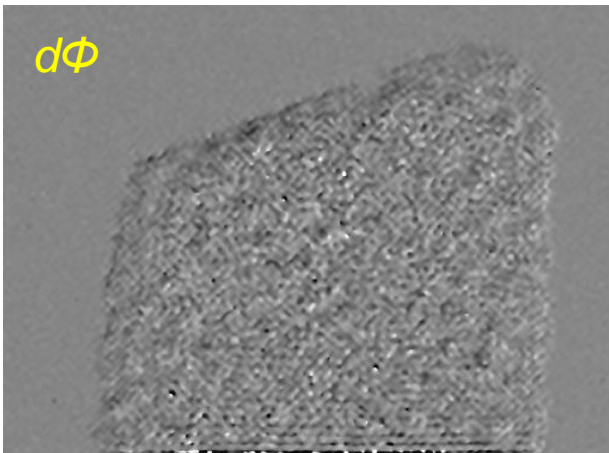
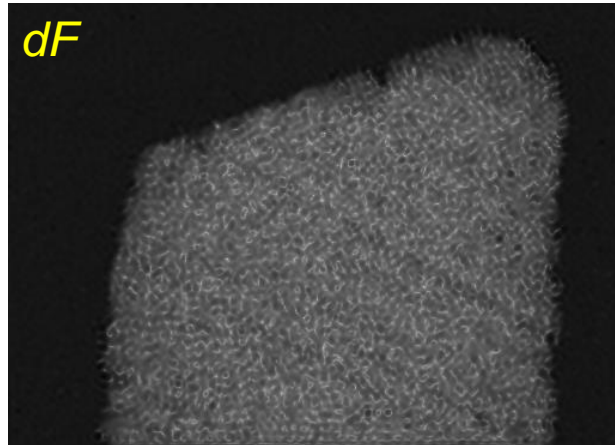
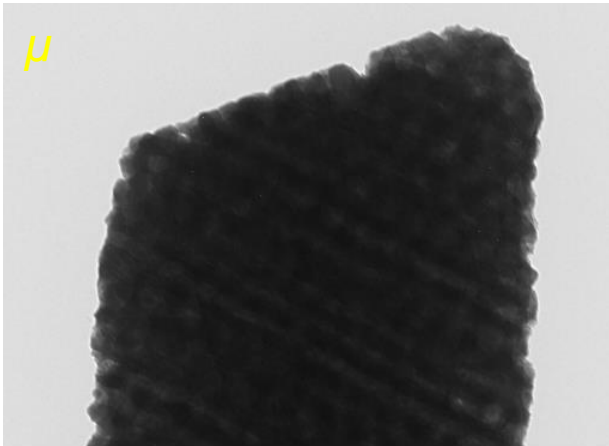




# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Application sur tube à rayons X

Illustration sur un échantillon de corail

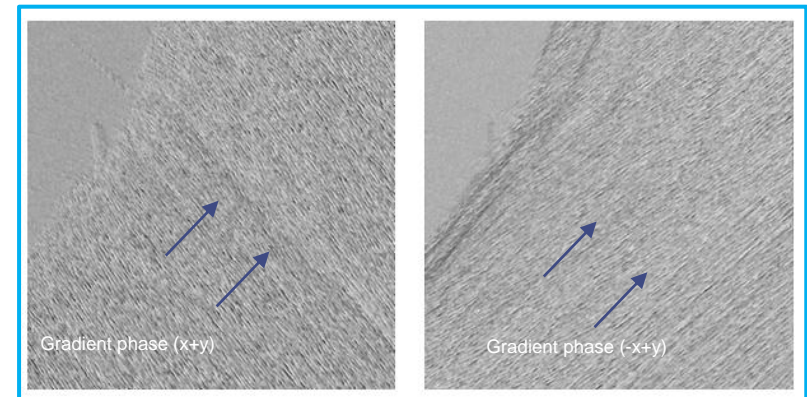
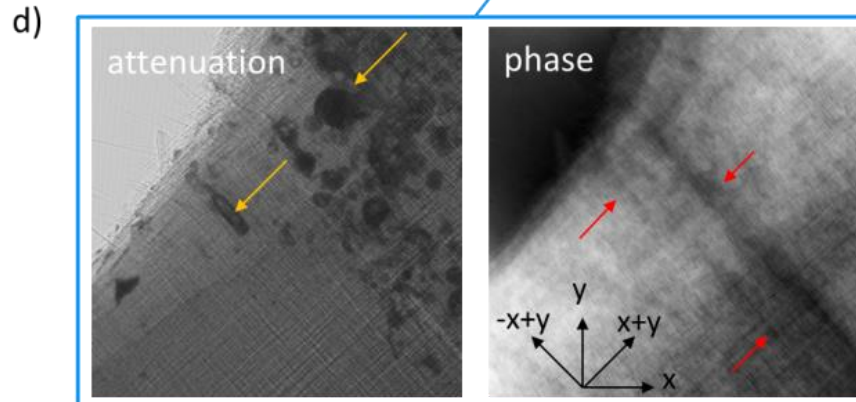
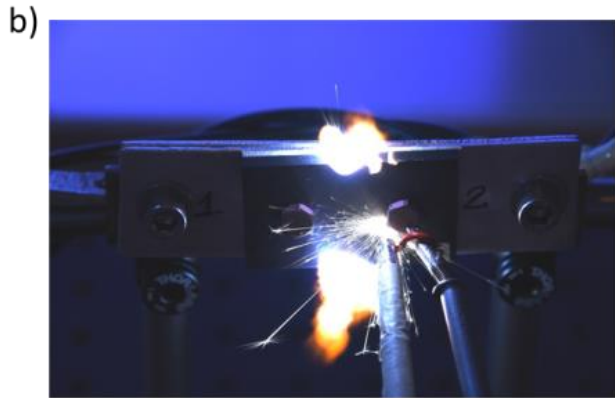
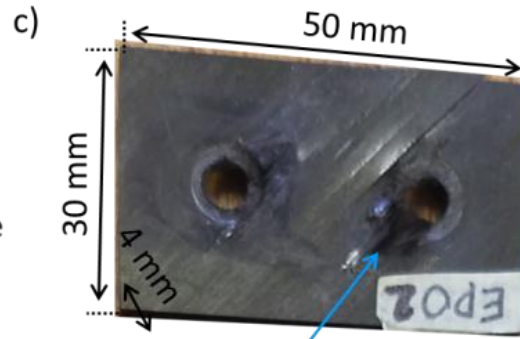
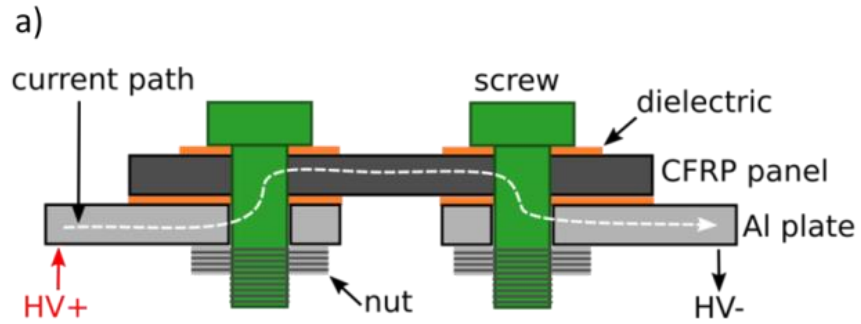


$$DF = -\ln \left( \frac{H_1^s / H_1^g}{H_0^s / H_0^g} \right)$$

# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Application sur tube à rayons X

### Contrôle de composite (CFRP) foudroyé



# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Clôture et carte de confiance

- Si l'estimation de  $\nabla\phi$  est parfaite en tout point  $(x, y)$ , alors  $\overrightarrow{\text{rot}}[\nabla\phi] = 0$
- Si  $\overrightarrow{\text{rot}}[\nabla\phi] \neq 0$  en un point  $(x, y)$ , alors en ce point  $\epsilon \neq 0$

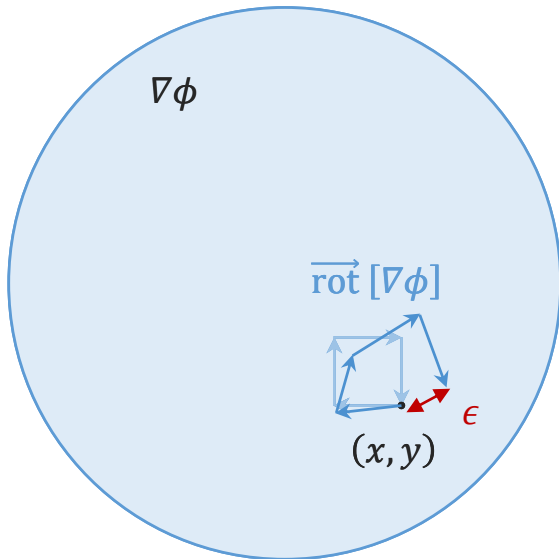


Schéma illustratif du lien entre circulation autour d'un point et propagation de l'erreur

$$C(x, y) = \partial_y \left[ \text{Image} \right] - \partial_x \left[ \text{Image} \right]$$
$$\epsilon(x, y) = 0 \Rightarrow C(x, y) = 0$$
$$C(x, y) \neq 0 \Rightarrow \epsilon(x, y) \neq 0$$

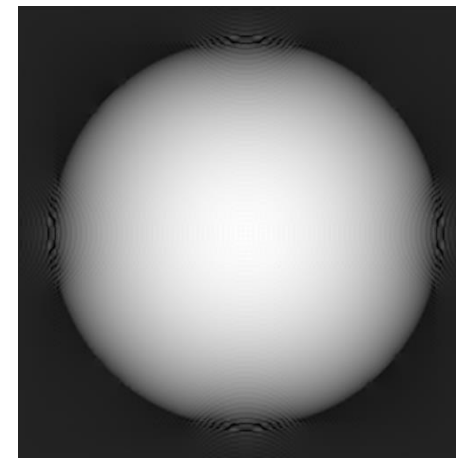
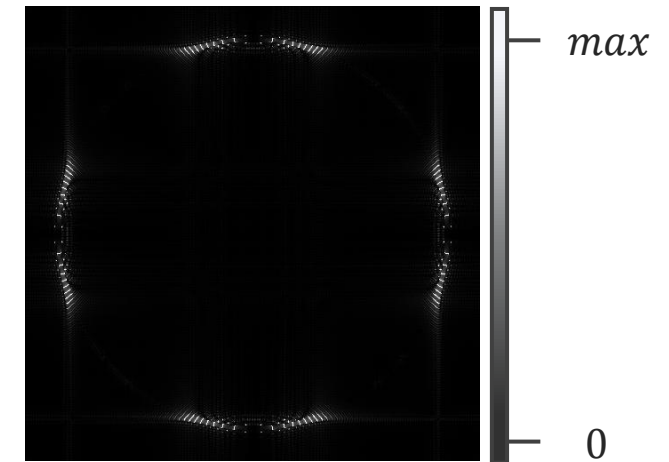


Image de phase impactée par des artefacts de sous-échantillonnage



Carte de clôture des dérivées associée

# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Clôture et carte de confiance

- *Objectif* : Discriminer chaque erreur en fonction de son type

$$C(x, y) = \epsilon_b + \epsilon_e + \epsilon_s$$

$\epsilon_b$  : reliée au bruit

$\epsilon_e$  : reliée à l'échantillonnage

$\epsilon_s$  : reliée aux sauts de phase (  $\phi \in [0; 2\pi[$  )

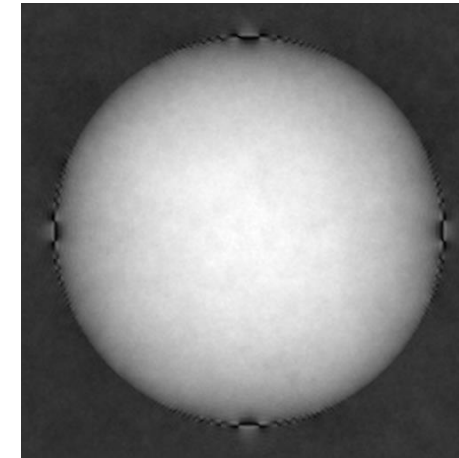
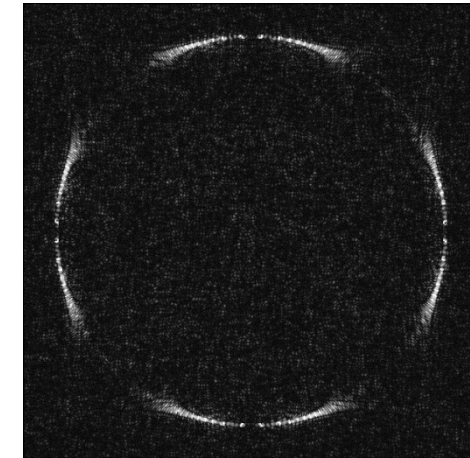
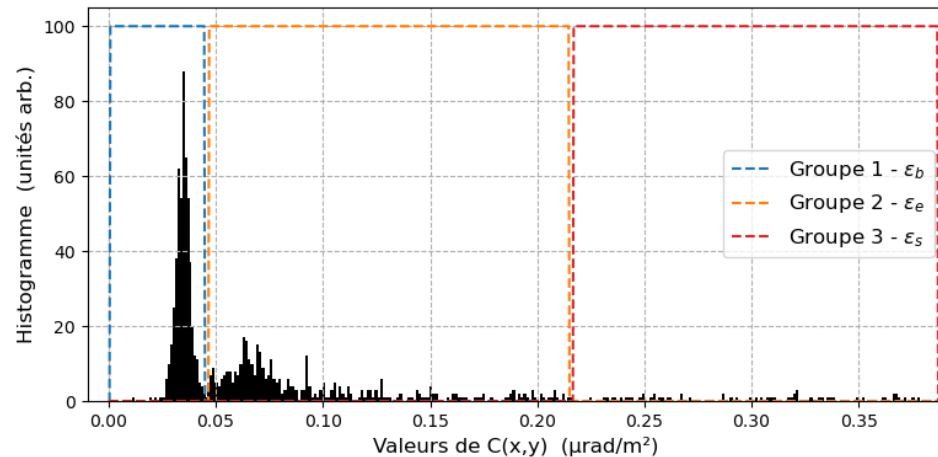


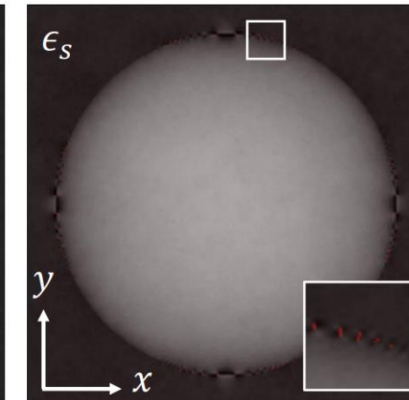
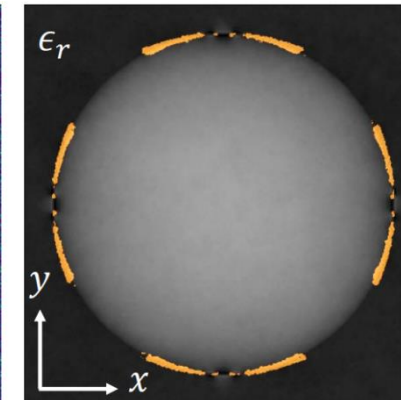
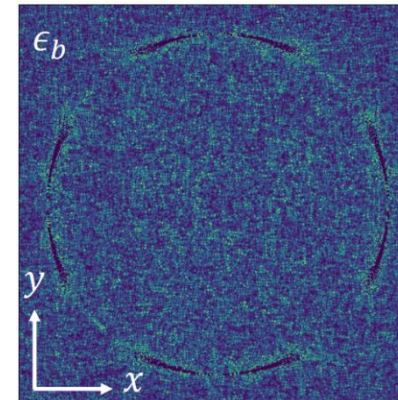
Image de phase impactée par divers artefacts



Carte de clôture des dérivées associée

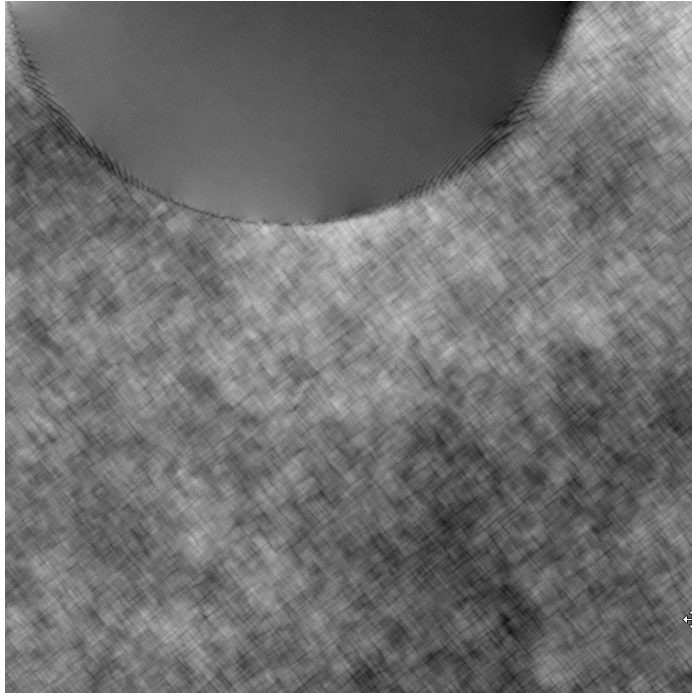


Histogramme de  $C(x, y)$



# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Exemple d'application



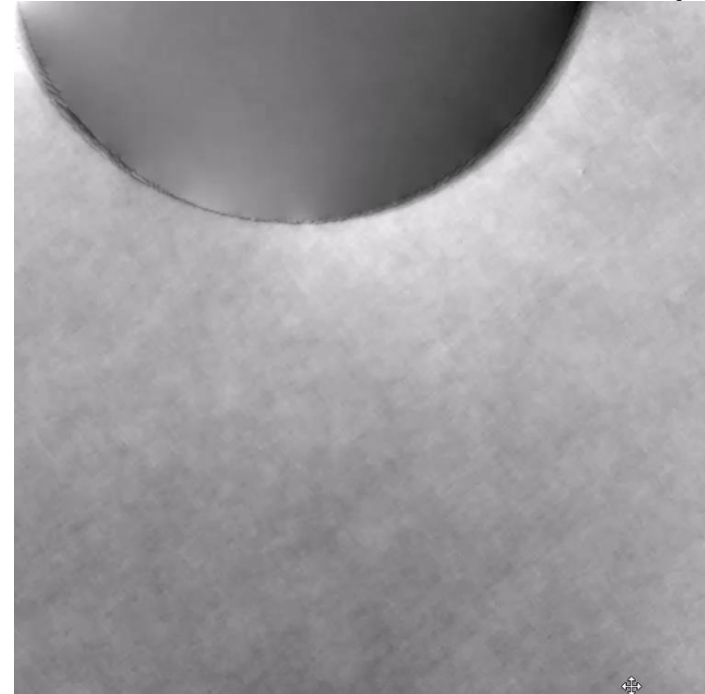
>>> Correction d'artefact via  
méthode MARIO >>>

→ Présentation Georges Giakoumakis

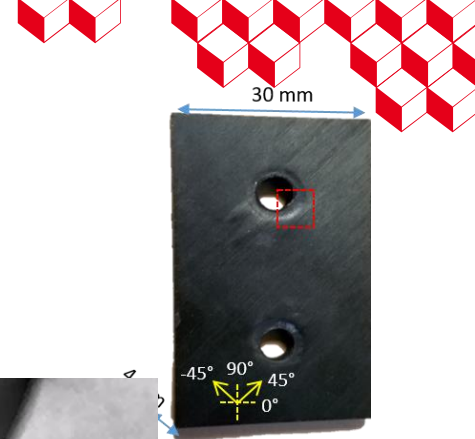
■ 17,03 %\*  
■ 0,03 %

■ Alertes de sous-échantillonnage de la phase  
■ Alertes de dislocation de la phase

\*Rapport du nombre de pixel "alerte" sur le nombre totale de pixel de l'image

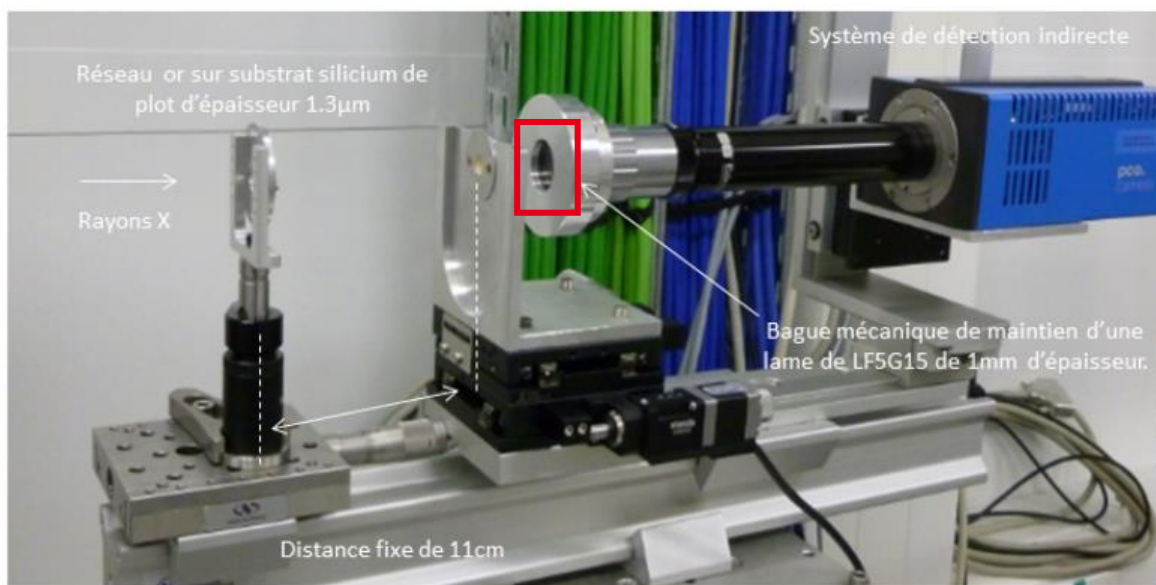


■ 0,74 %  
■ 0,003 %

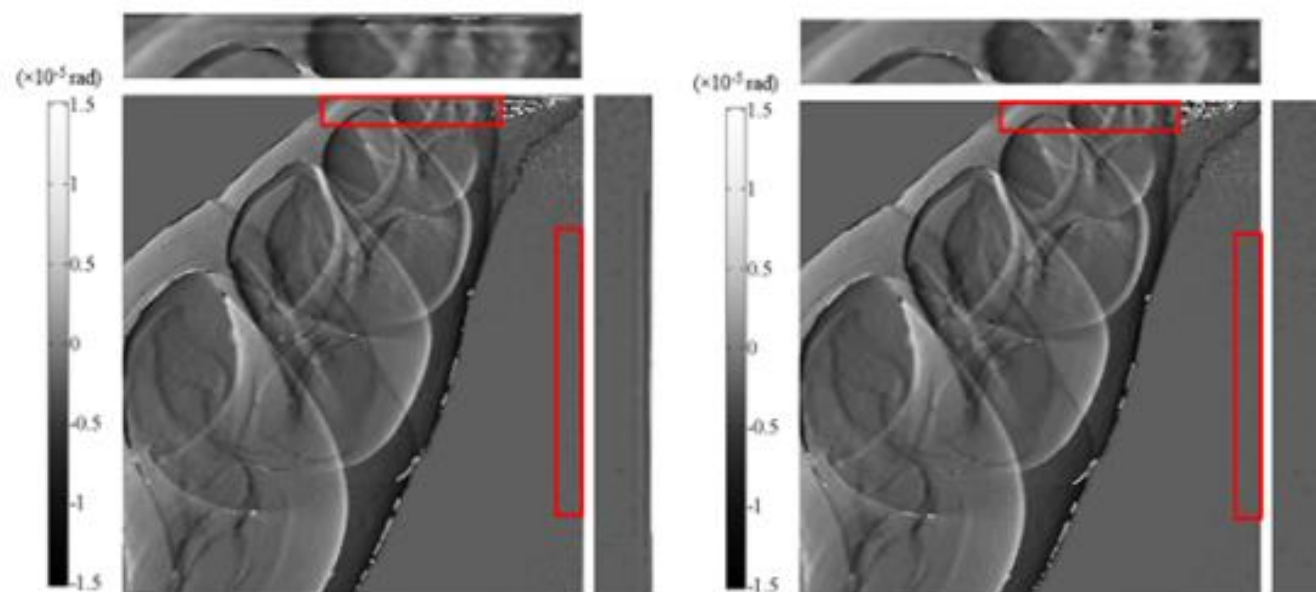


# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

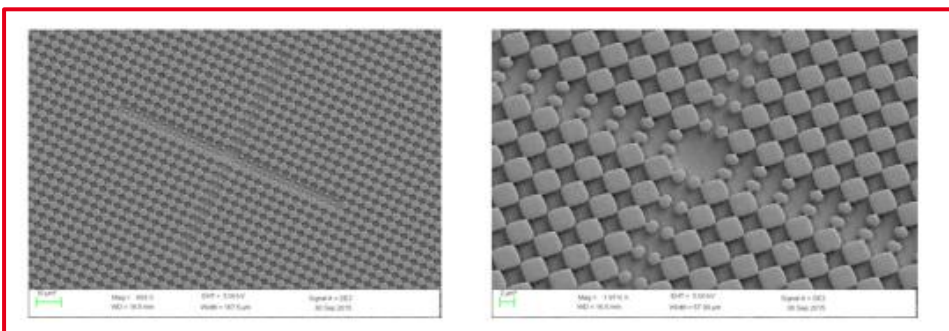
Application historique sur source synchrotron  
Ligne Métrologie de SOLEIL



Gradient de phase d'un coquillage

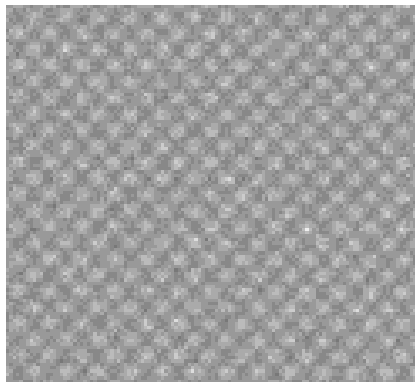
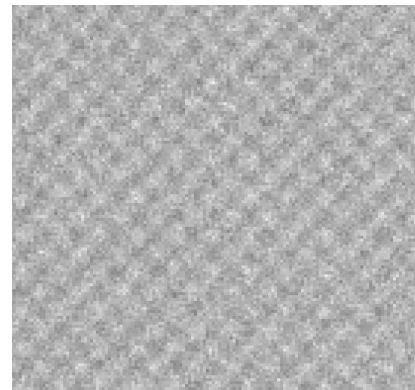
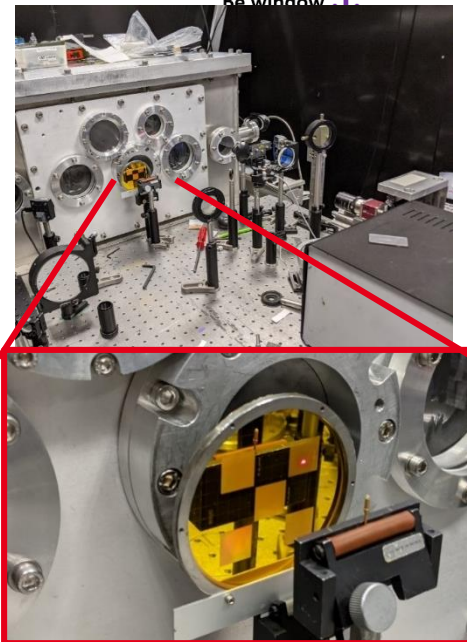
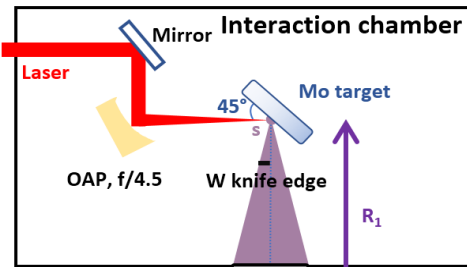


Correction des rupture de périodicité du réseau \*  
(méthode WASP) avant (gauche) et après (droite)



# L'IDML pour l'imagerie par rayons X

## Application sur source $K\alpha$ laser-plasma Plateforme ASUR, Laboratoire LP3



2 exemples d'interferogramme produits a deux intensités laser (énergie sur cible 12 mJ en haut et 4mJ en bas)

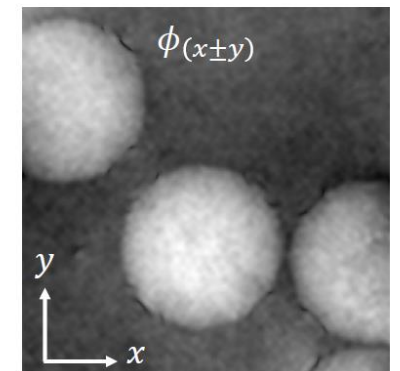
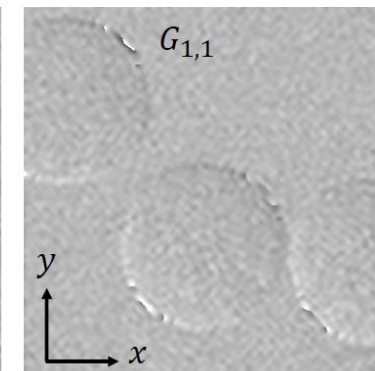
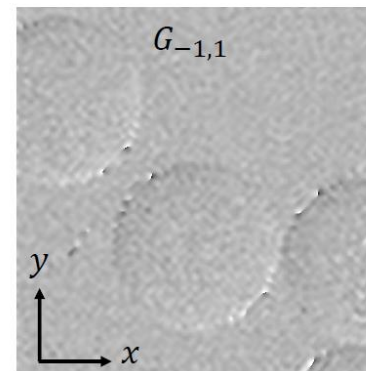
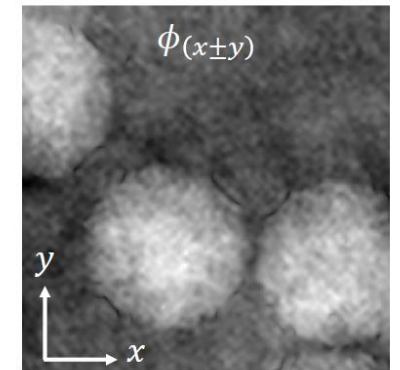
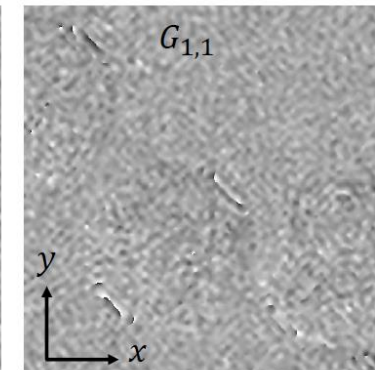
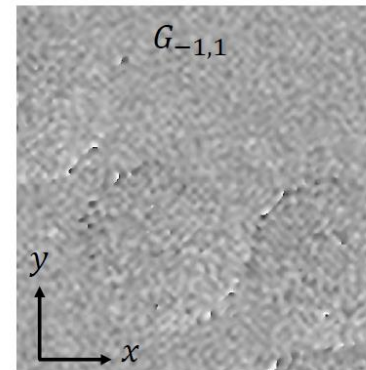
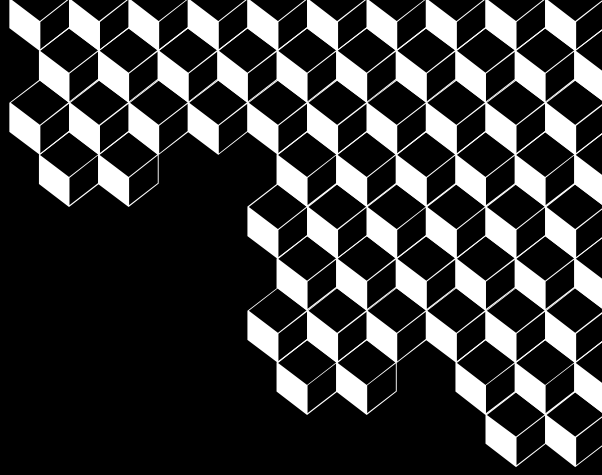


FIGURE 4.7 – Extraction de phase brute de billes en PMMA pour une énergie sur cible de 12mJ (en haut) et 4mJ (en bas). Les gradients extraits sont les gradients croisés  $G_{-1,1}(x, y)$  et  $G_{1,1}(x, y)$ .



list

A white L-shaped graphic element consisting of a horizontal line extending to the right and a vertical line extending downwards from the right end of the horizontal line.



# Session 2: Métrologie

*Chairwoman : Cindy Bellanger*

- *L'interféromètre 4 ondes comme étalon secondaire pour une mesure exacte des caractéristiques spatiales et radiométriques des détecteurs infrarouge. **Edouard Huard**, ONERA*
- *Le diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser avec pupille segmentée par interférométrie à décalage multilatéral PISTIL. **Bastien Rouzé**, ONERA*

# Session 2: Métrologie

*Chairwoman : Cindy Bellanger*

- *L'interféromètre 4 ondes comme étalon secondaire pour une mesure exacte des caractéristiques spatiales et radiométriques des détecteurs infrarouge. **Edouard Huard**, ONERA*
- *Le diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser avec pupille segmentée par interférométrie à décalage multilatéral PISTIL. **Bastien Rouzé**, ONERA*

# L'IDML pour la métrologie de détecteurs matriciels en infrarouge



Edouard Huard de Verneuil

Contributions :

Joris Gorée, Sophie Derelle,  
Julien Jaeck et Jérôme Primot

## *Plan de la présentation*

### I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

*I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan*

*I.2 Particularité et exigences de la mesure IDQL dans ce contexte*

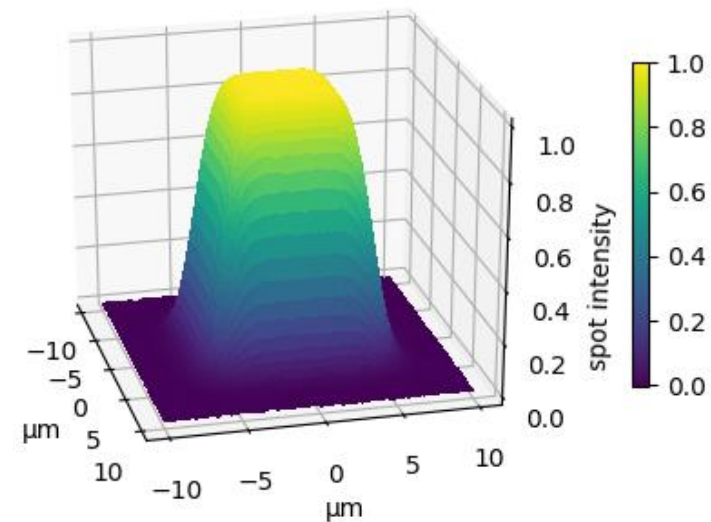
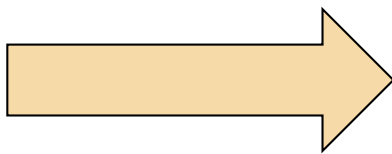
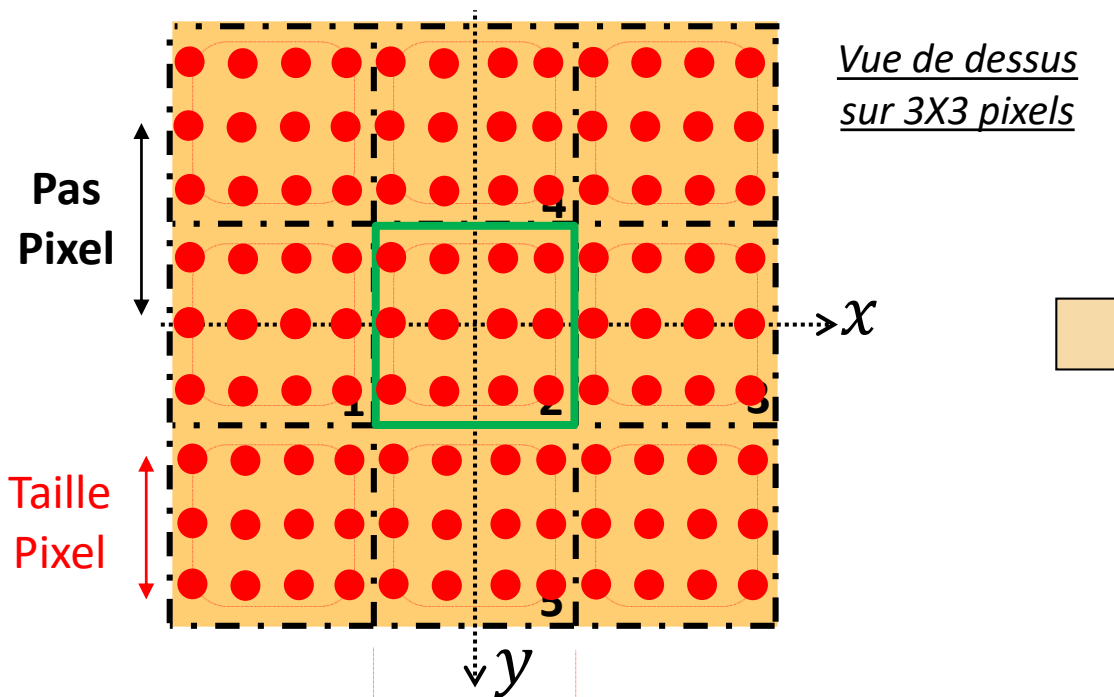
### II] l'IDML comme moyen métrologique de mesure direct de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

*II.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues*

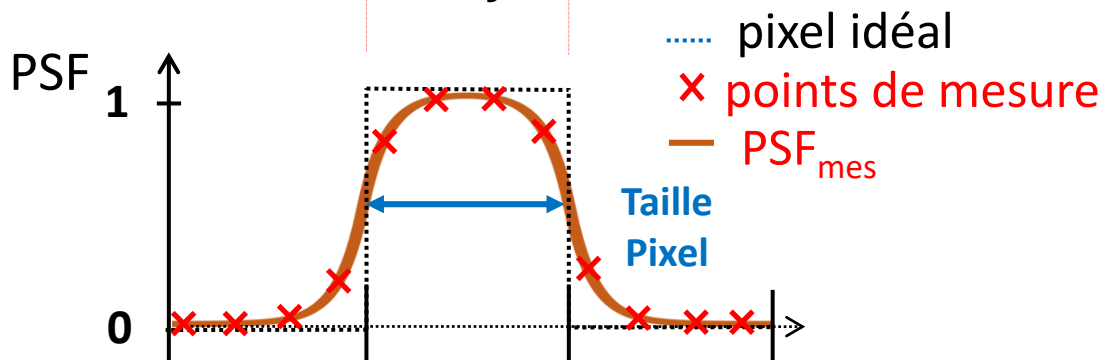
*II.2 Non-invariance et nouvelles exigences sur les futurs réseaux de test*

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan



2D PSF Pixel  
(Simulation)

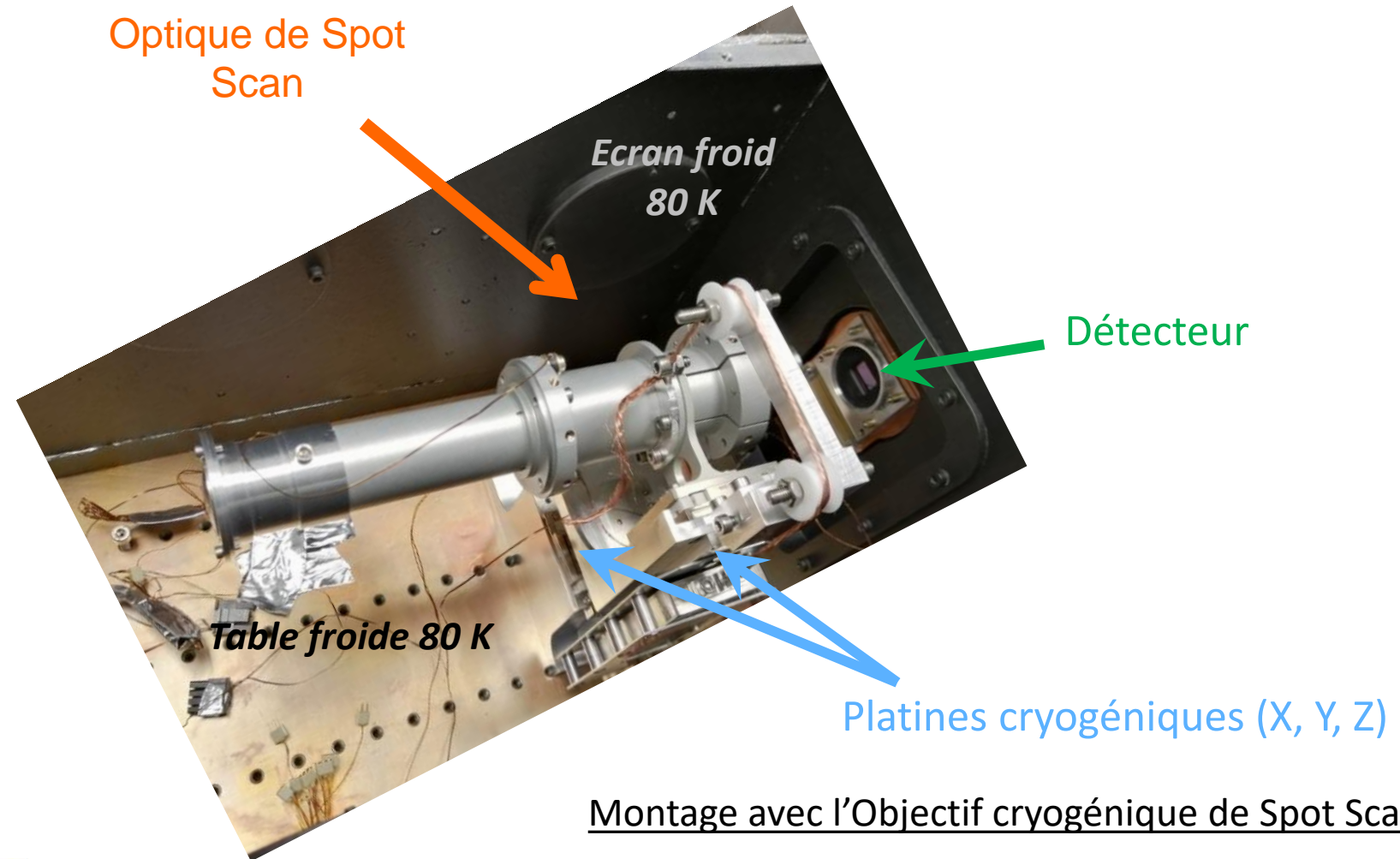


**Besoin de mesure absolue de la PSF pixel pour :**

- Systémiers pour la conception de caméras optiques
- Utilisateurs finaux dans le but de déconvoluer les images (exemple : astronomie)

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

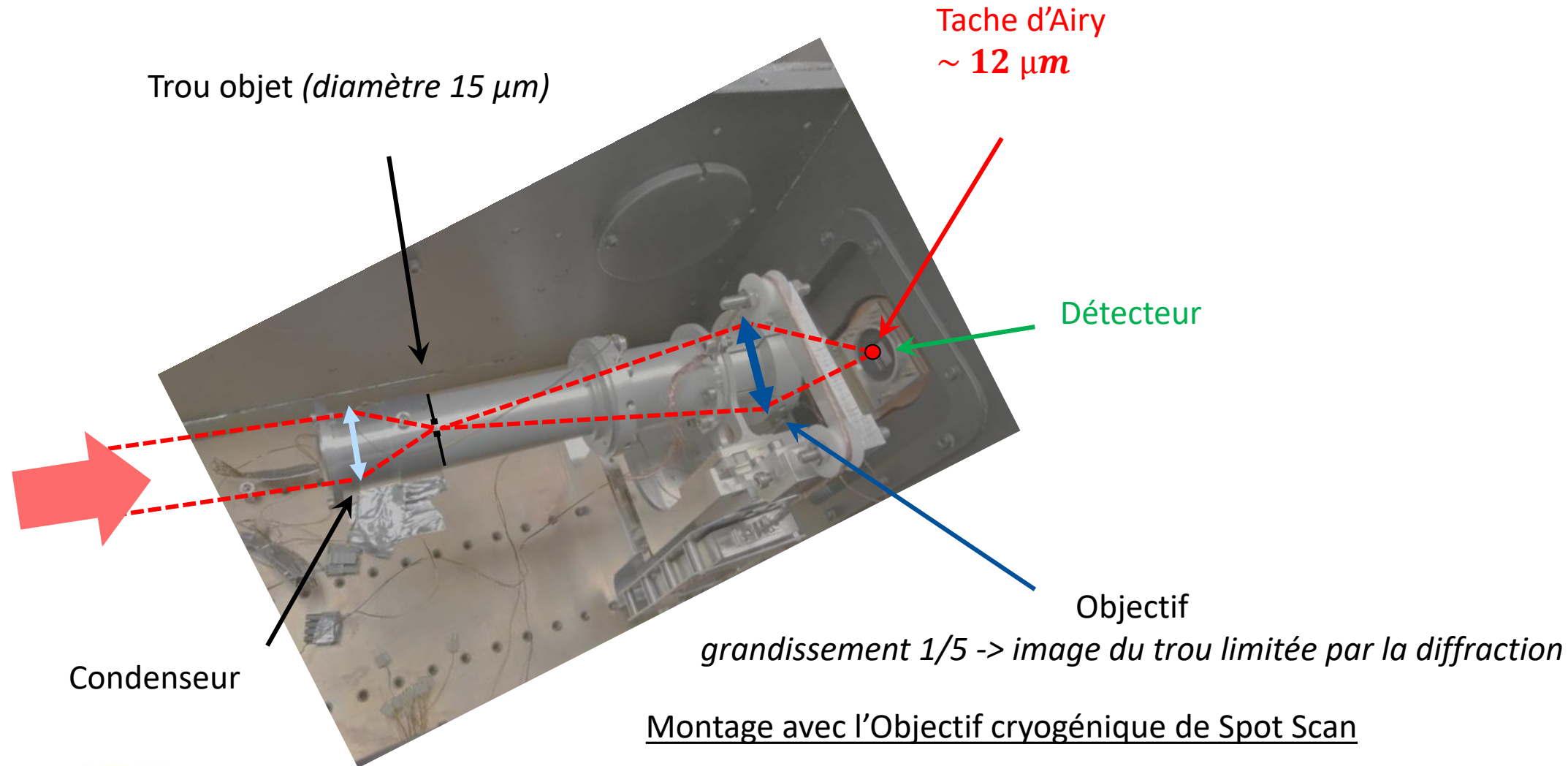
## I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan



(thèse co-financée FOCUS J. Gorée Nov. 2020 – Nov. 2023)

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan

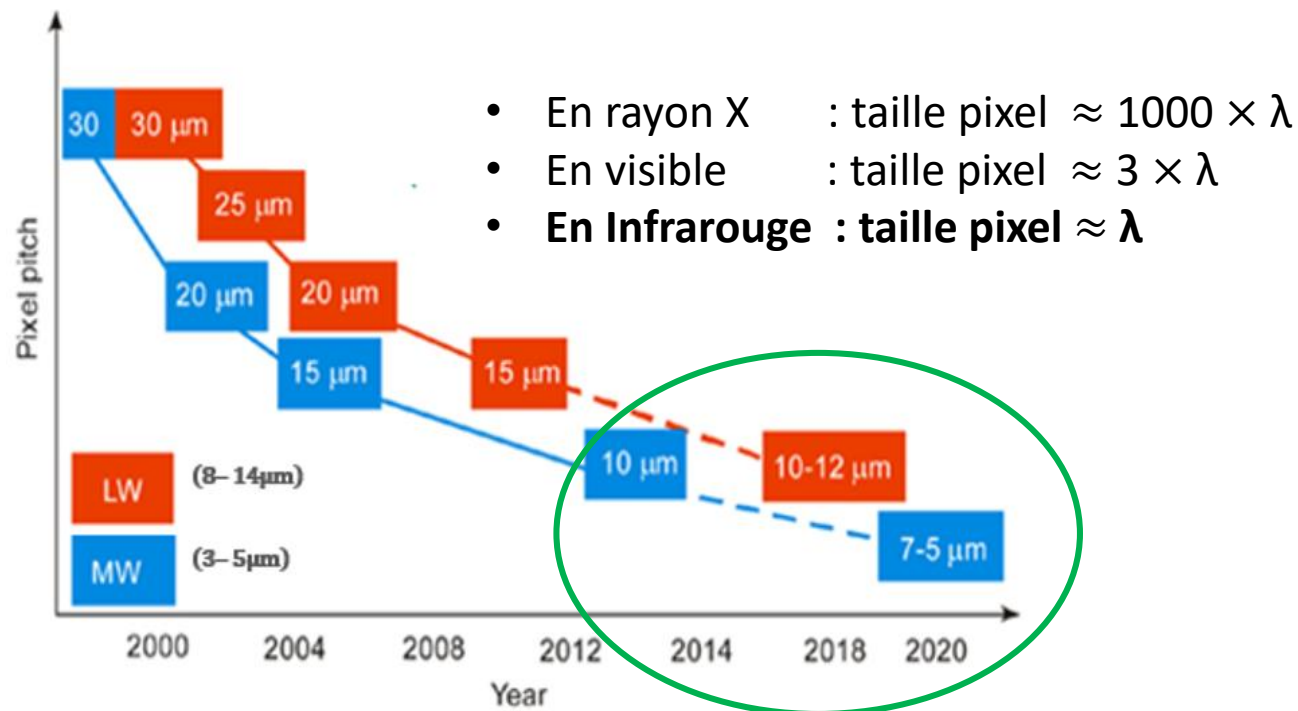
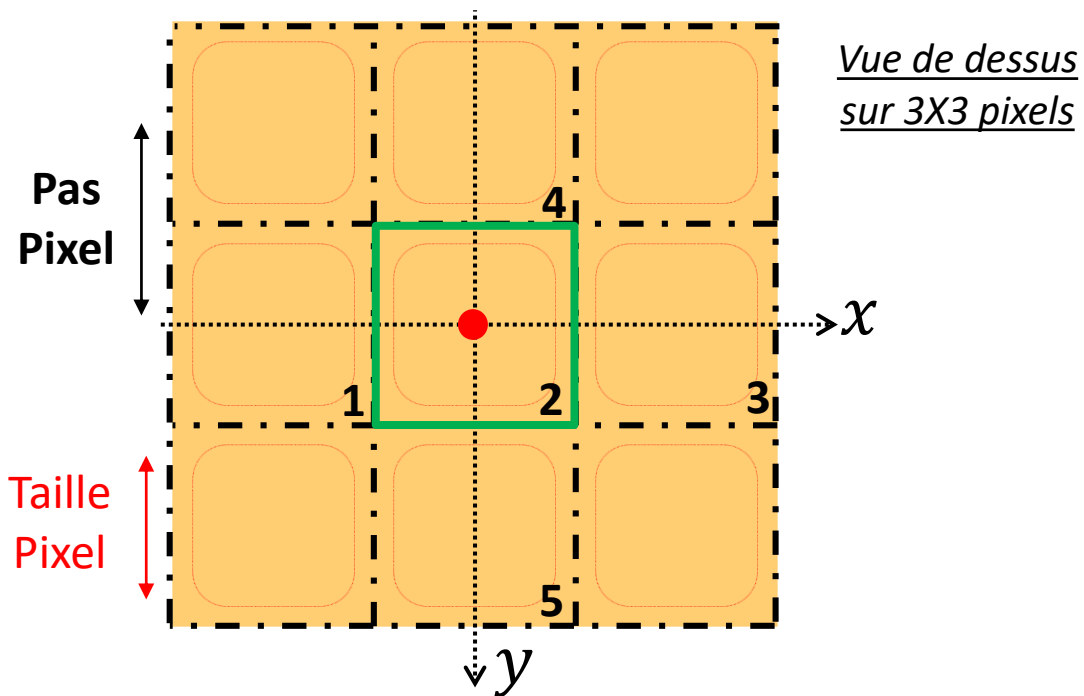


Montage avec l'Objectif cryogénique de Spot Scan

(thèse co-financée FOCUS J. Gorée Nov. 2020 – Nov. 2023)

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan



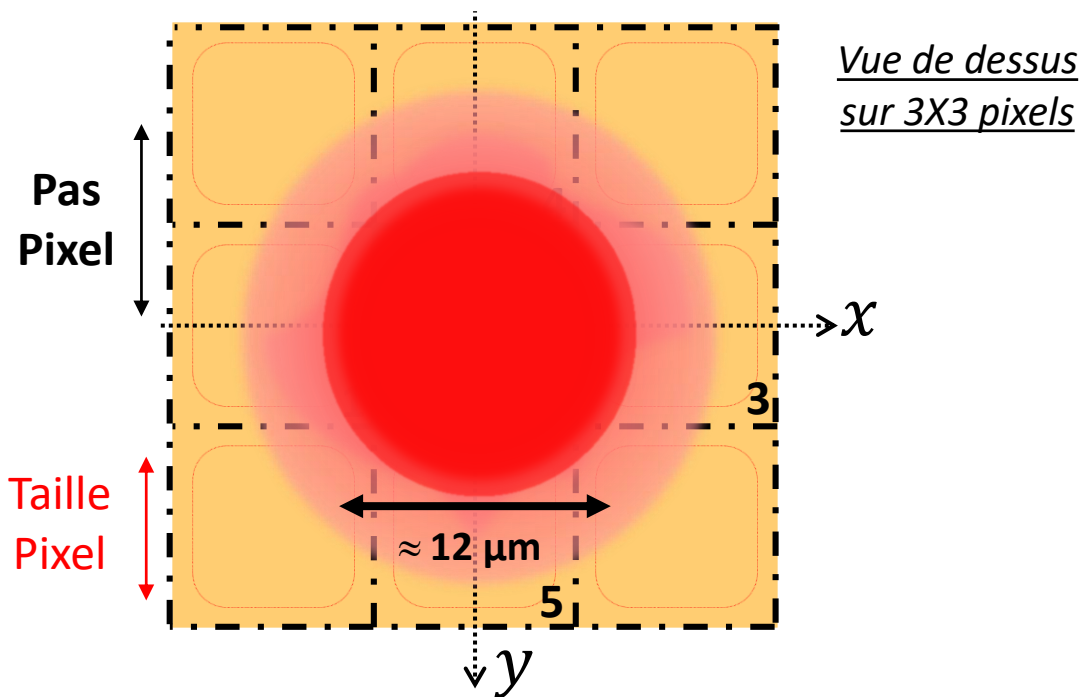
Evolution de la taille pixel pour la technologie HgCdTe Durant la période 2000 – 2020. *Antoni Rogalski, RPP, 2016*

$$PSF_{mes} = PSF_{optique} * PSF_{pixel}$$



# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

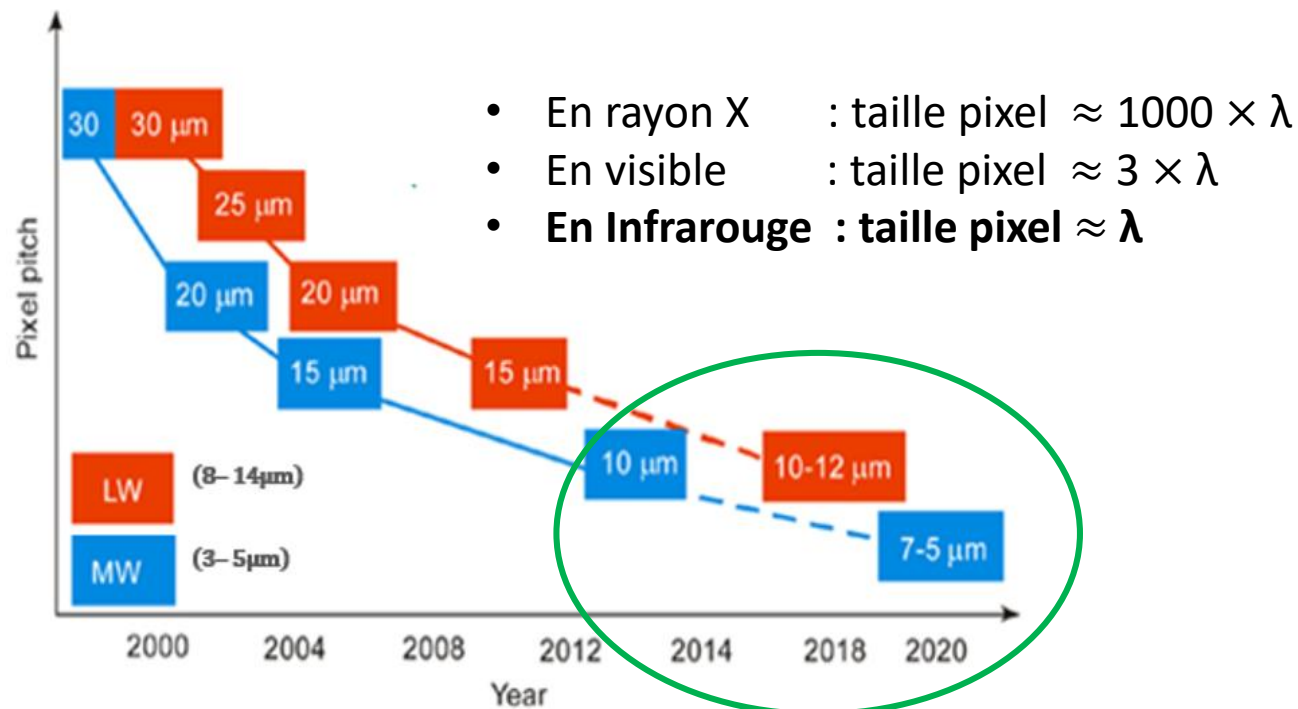
## I.1 Besoin de la mesure IDQL pour le spot scan



Conséquences sur la déconvolution de mesure :

- Sensible à la focalisation
- Sensible aux aberrations optiques

➔ *Besoin d'une mesure absolue de la PSF optique*



Evolution de la taille pixel pour la technologie HgCdTe Durant la période 2000 – 2020. *Antoni Rogalski, RPP, 2016*

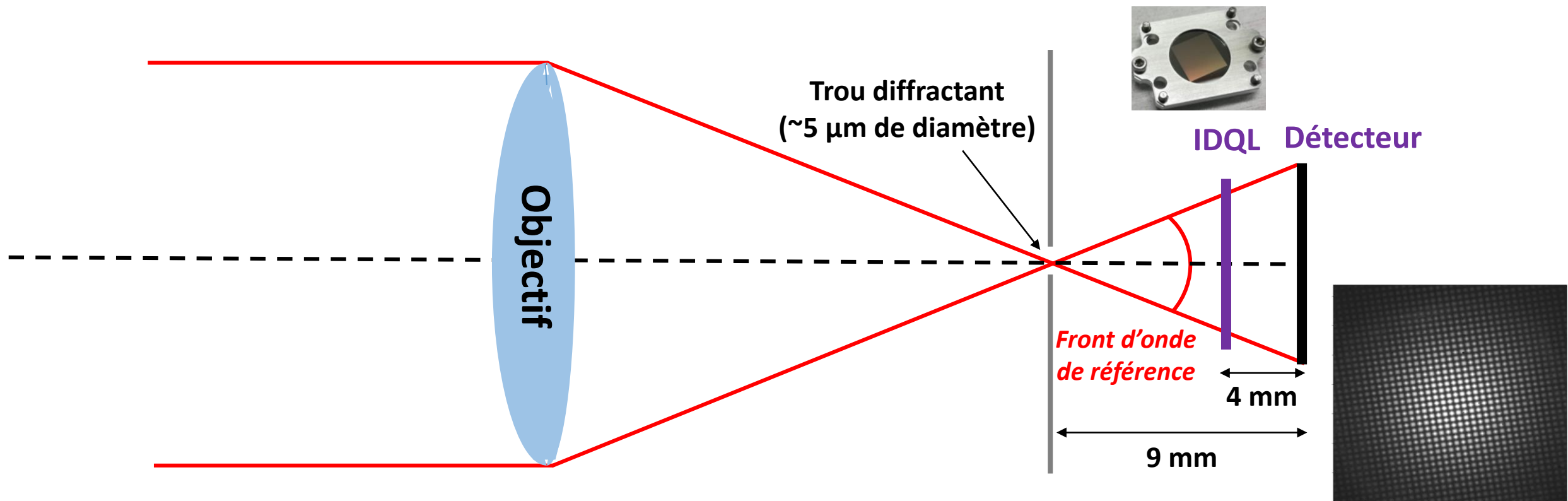
$$PSF_{mes} = PSF_{optique} * PSF_{pixel}$$

➔ *Mesure de l'écart à un front sphérique idéal via l'IDQL*

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## 1.2 Particularité et exigences de la mesure IDQL dans ce contexte

### Etape 1 : Etalonnage de l'IDQL avec un trou diffractant une onde sphérique parfaite

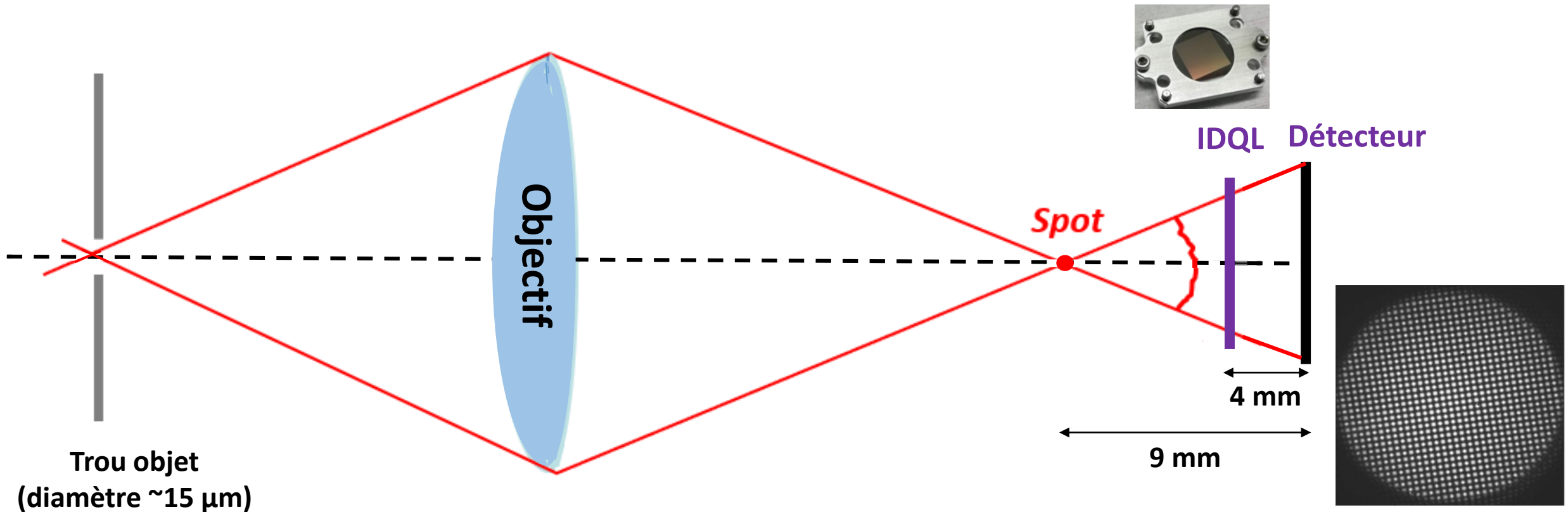


Utilisation du Principe d'Huygens – Fresnel  
comme étalon primaire

# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## 1.2 Particularité et exigences de la mesure IDQL dans ce contexte

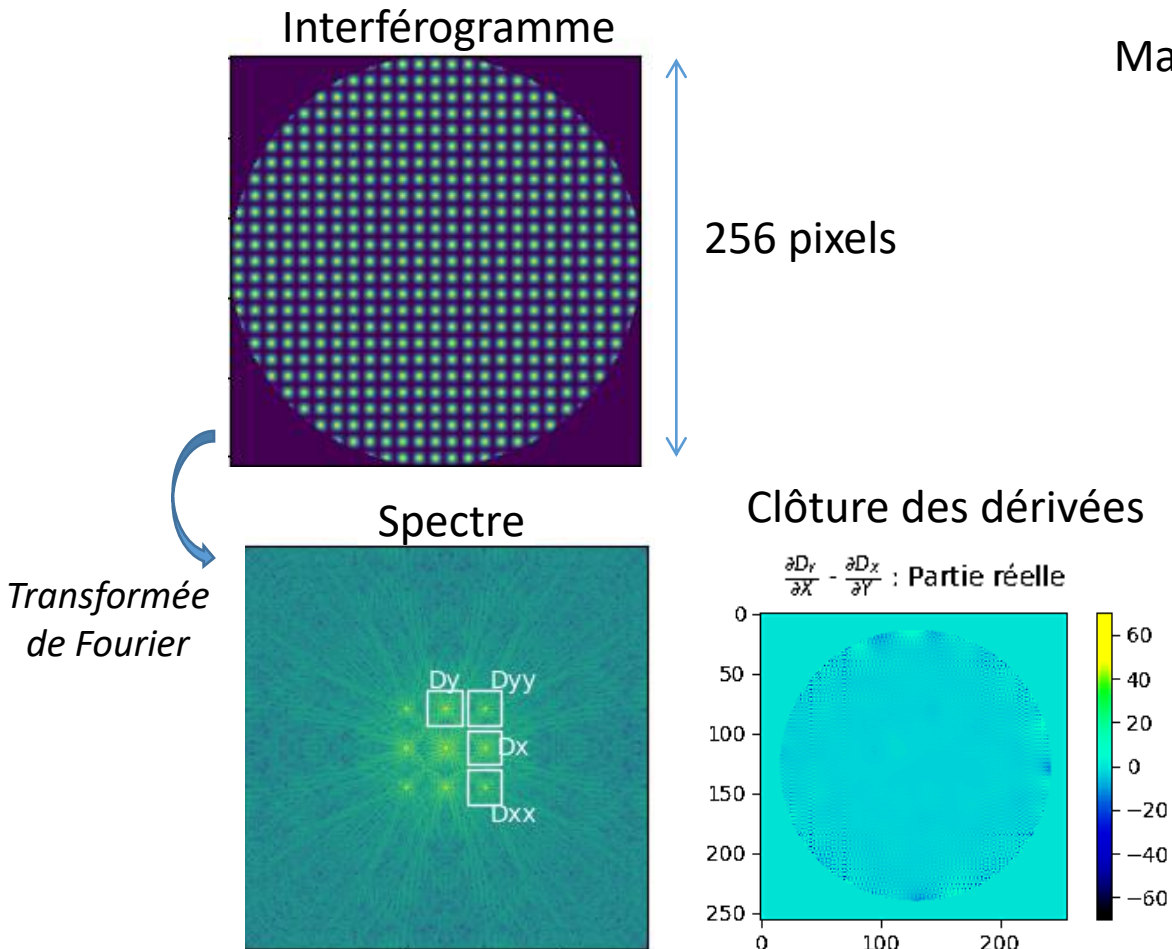
**Etape 2 : Mesure de l'écart (du front d'onde du spot) à cette onde sphérique parfaite**



# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## 1.2 Particularité et exigences de la mesure IDQL dans ce contexte

- Faible nombre de points de mesure, typ. 64x64 -> sensibilité aux problèmes de bords de la pupille



Mais degrés de liberté et points fort de l'IDQL pour la mesure :

- Ajustement de la distance entre IDQL et le détecteur pour jouer sur la dynamique de mesure
- Estimation de l'erreur sur l'écart de front d'onde grâce à la clôture des dérivées
- Front d'onde divergent, permet d'ajuster l'échantillonnage de l'interférogramme

**On souhaite mesurer ici des défauts très faibles (optique performante, polissage classique), et plutôt basses fréquences (pas de variations abrupte de phase) comme c'est le cas dans d'autres applications de l'IDML en imagerie**

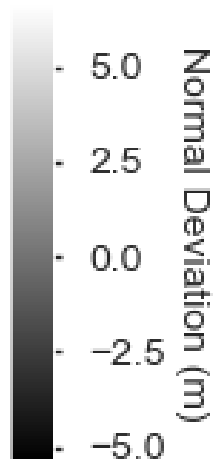
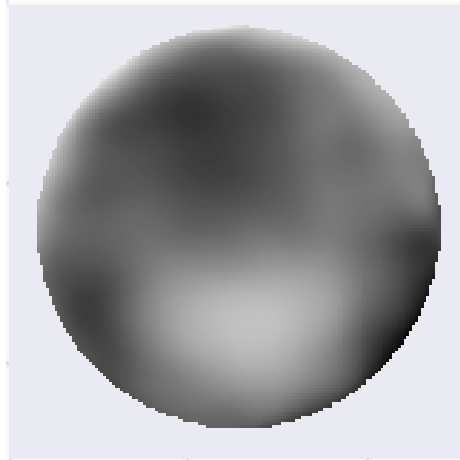
# I] L'IDQL comme étalon secondaire d'une mesure spot scan de la réponse spatiale d'un détecteur matriciel

## 1.2 Particularité et exigences de la mesure IDQL dans ce contexte

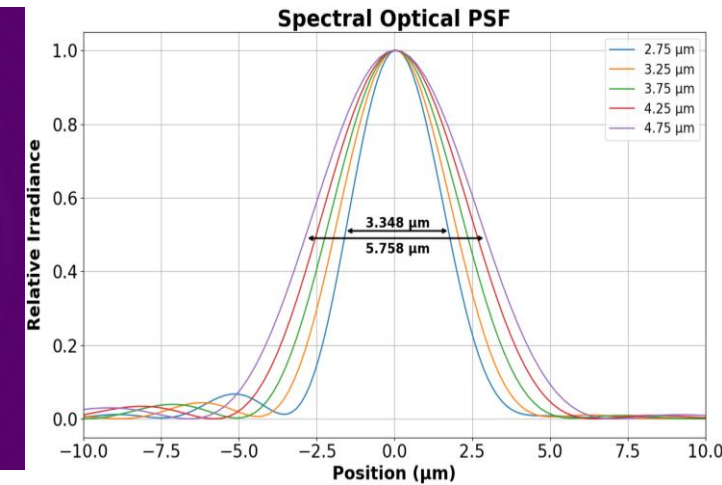
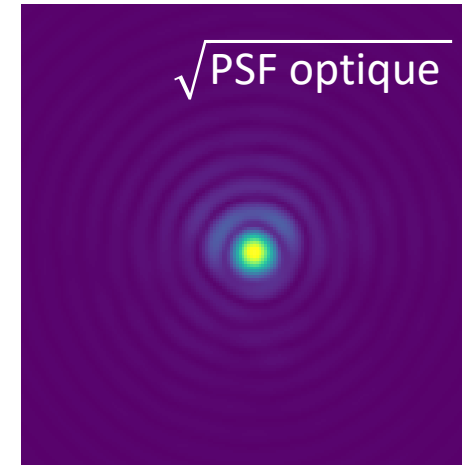
$$\sigma_{RMS_{V,elghe\_cor}} = 1.838e-07 \text{ m}$$

$$\sigma_{PV_{V,elghe\_cor}} = 1.207e-06 \text{ m}$$

1e-7



Propagation en  
espace libre



Front d'onde de  
l'objectif

**Attention aux hypothèses de calcul car optique très ouverte ici  
(N=1)**

→ **Conditions de l'approximation de Fresnel non respectées**

**Vers une utilisation du principe de Rayleigh-Sommerfeld qui est  
plus général mais plus lourd à utiliser**

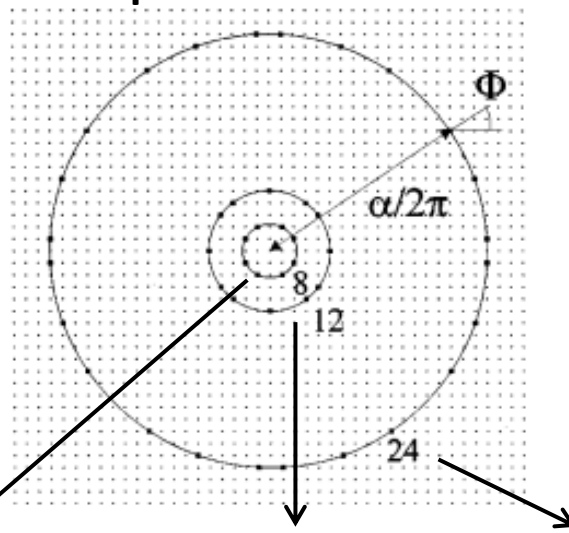
## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

### 1.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues

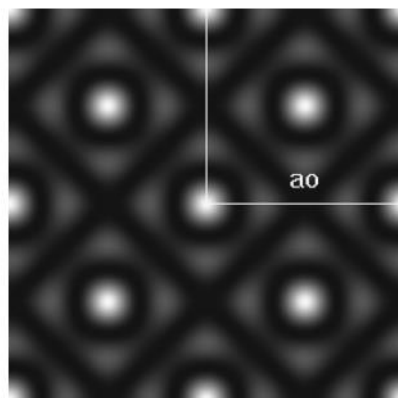
#### Fonctions de l'IDML

- Mesure de phase / front d'onde
- **Générateur de modulations spatiales**
- ....

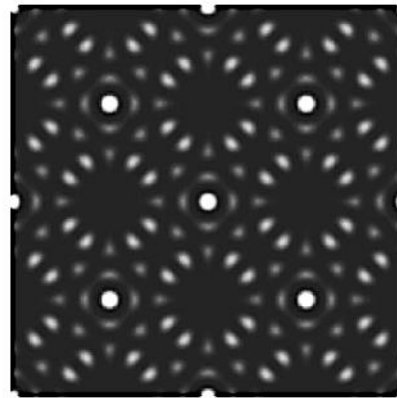
Ordres diffractés :  
Intersection des cercles de  
Montgomery avec une grille  
cartésienne



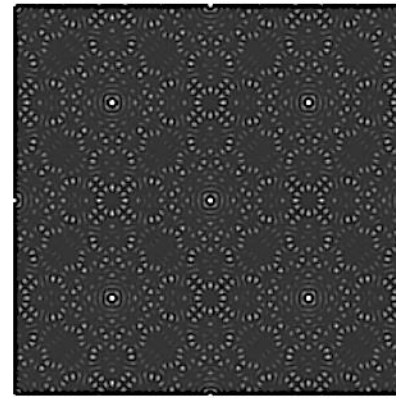
N. Guérineau et J. Primot,  
*Nondiffracting array generation using an N-wave interferometer.*  
J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 16, pp. 293–298, 1999.



Interférogramme  
8 ordres



Interférogramme  
12 ordres



Interférogramme  
24 ordres

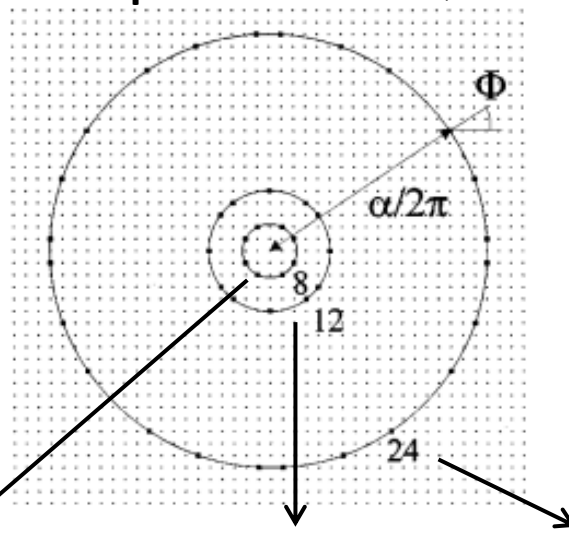
## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

### 1.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues

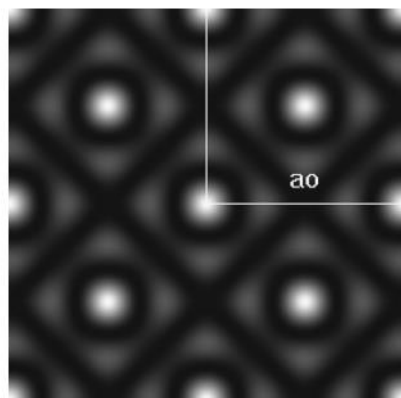
#### Fonctions de l'IDML

- Mesure de phase / front d'onde
- **Générateur de modulations spatiales** → CSIG : Continuously Self Imaging Grating
- ....

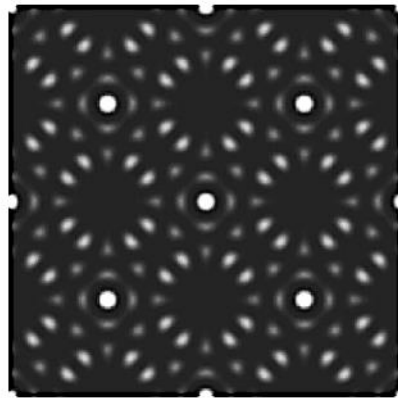
Ordres diffractés :  
Intersection des cercles de  
Montgomery avec une grille  
cartésienne



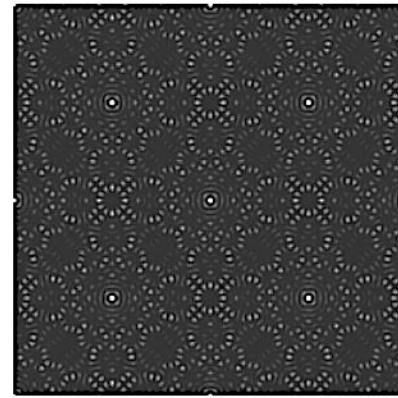
N. Guérineau et J. Primot,  
*Nondiffracting array generation using an N-wave interferometer.*  
J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 16, pp. 293–298, 1999.



Interférogramme  
8 ordres



Interférogramme  
12 ordres



Interférogramme  
24 ordres

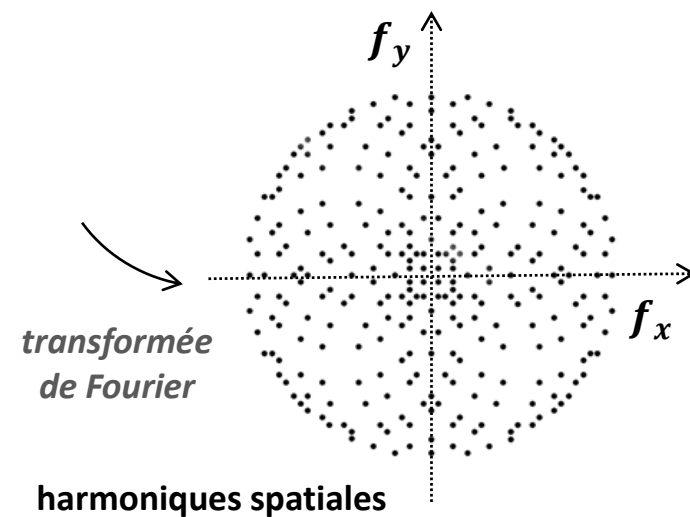
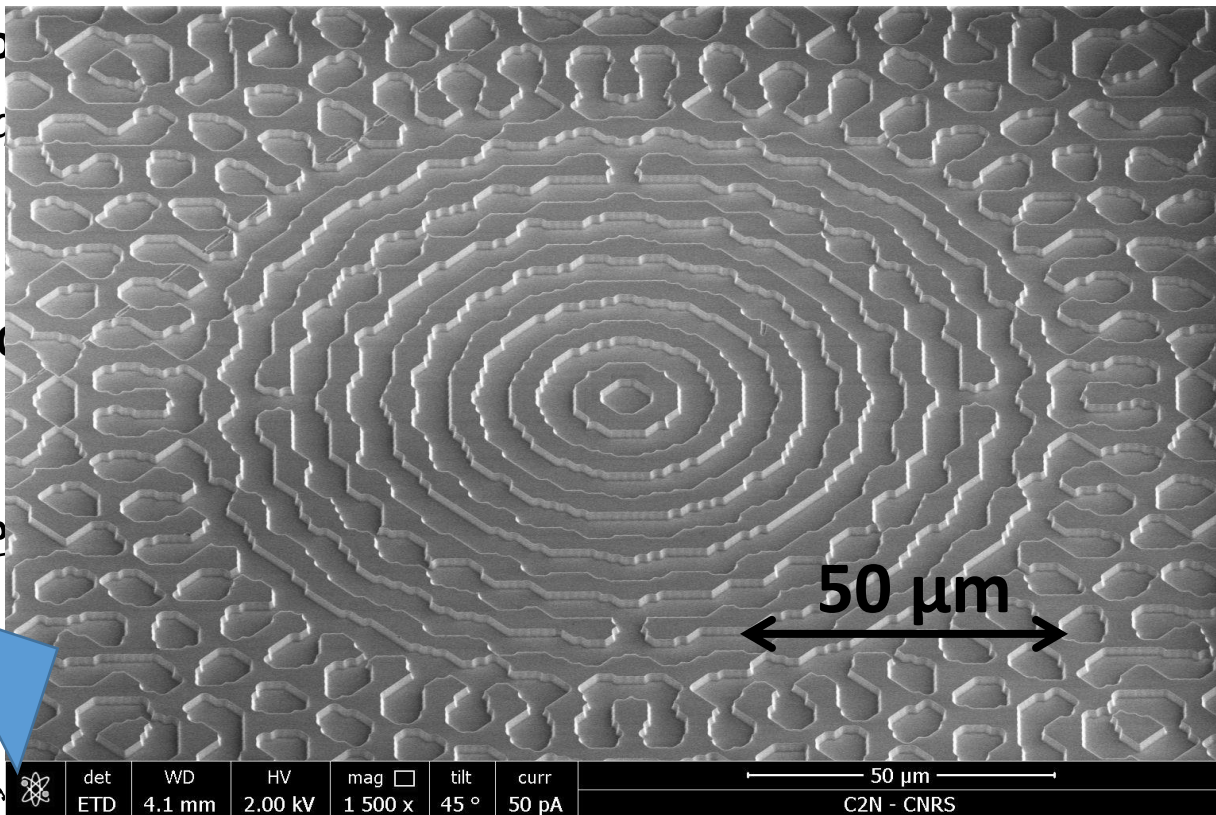
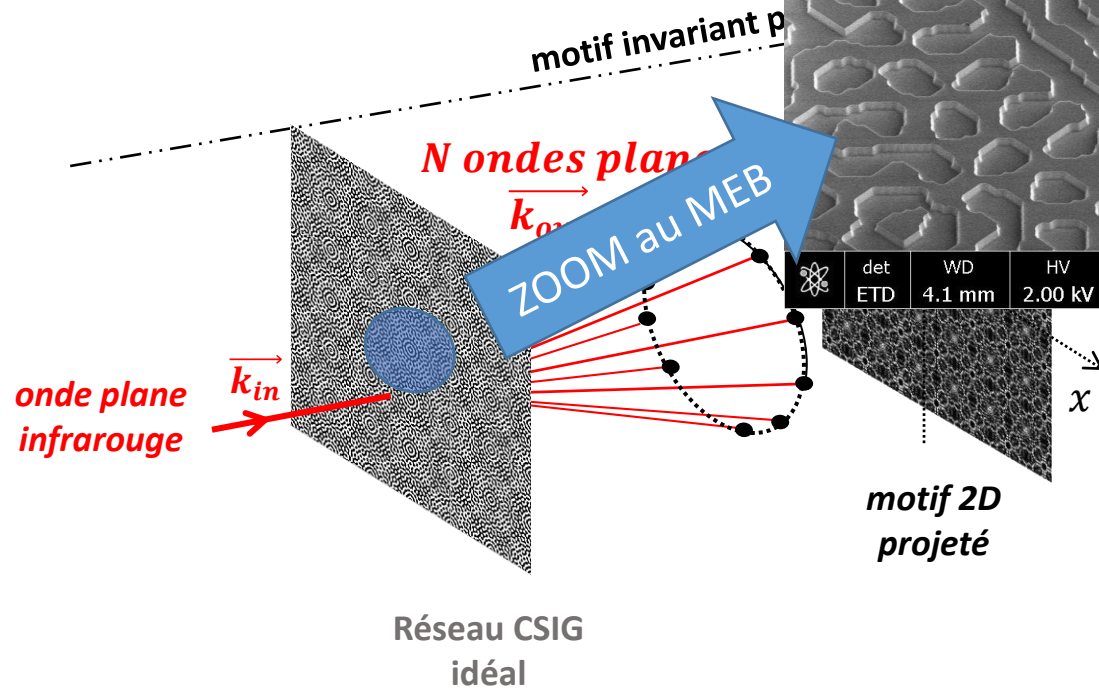
## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fo

### I.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fré

#### Fonctions de l'IDML

- Mesure de phase / front d'onde
- **Générateur de modulations spatiales**
- ....

→ CSIG : C





# II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

## 1.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues

### Fonctions de l'IDML

- Mesure de phase / front d'onde
- **Générateur de modulations spatiales**
- ....



Exactement ce qu'il faut pour mesurer une fonction de transfert !



Modulations spatiales générées

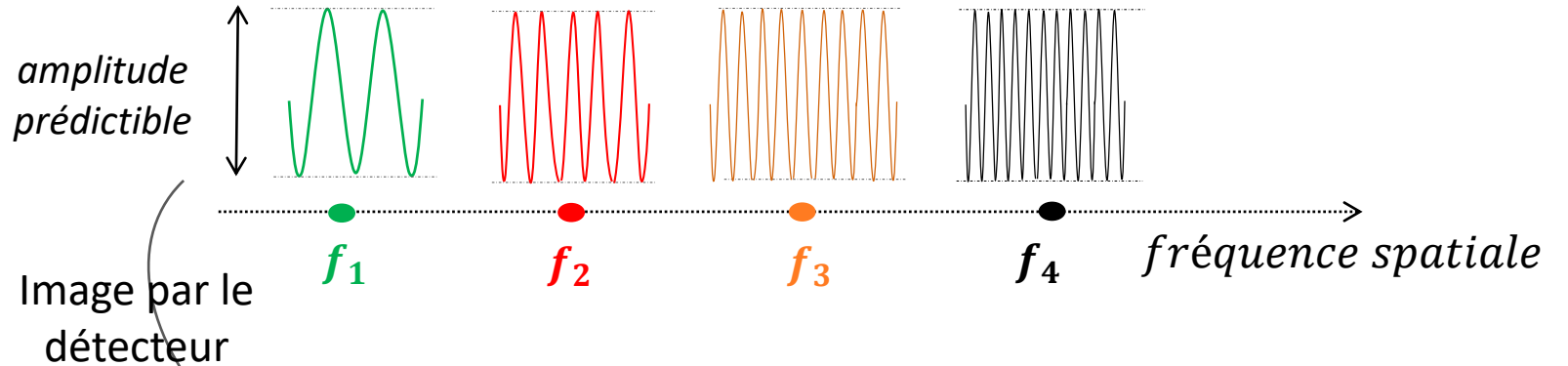
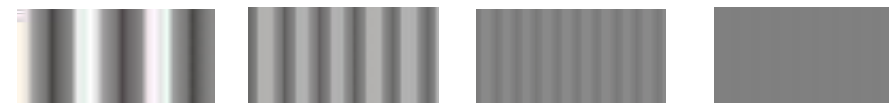
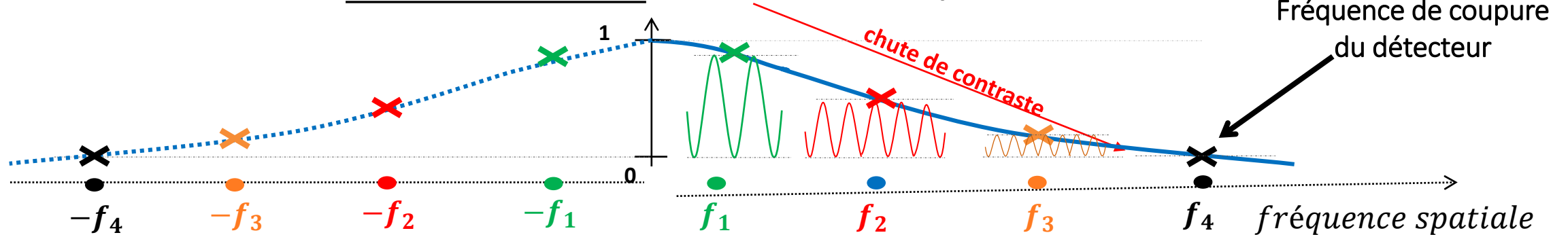


Image par le détecteur



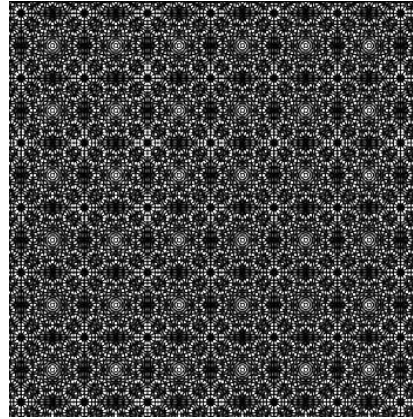
Modulations spatiales détectées

Fonction de transfert

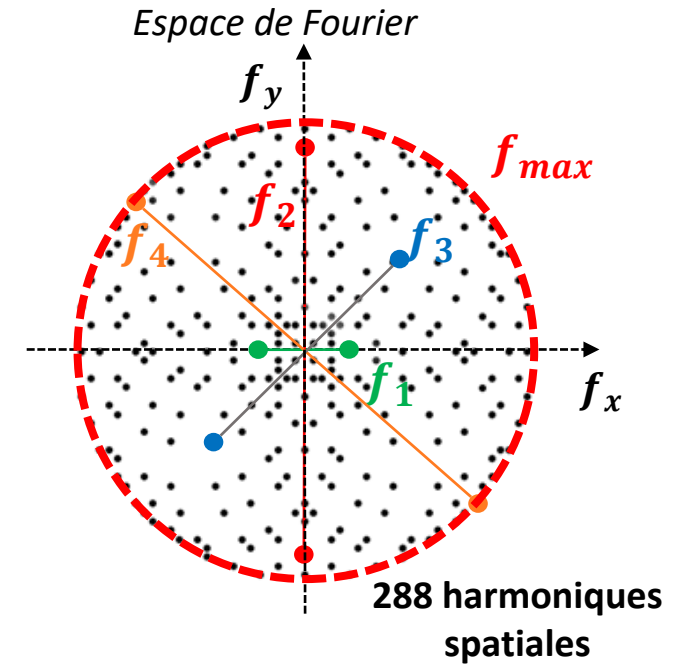
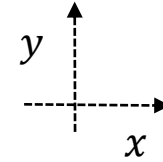
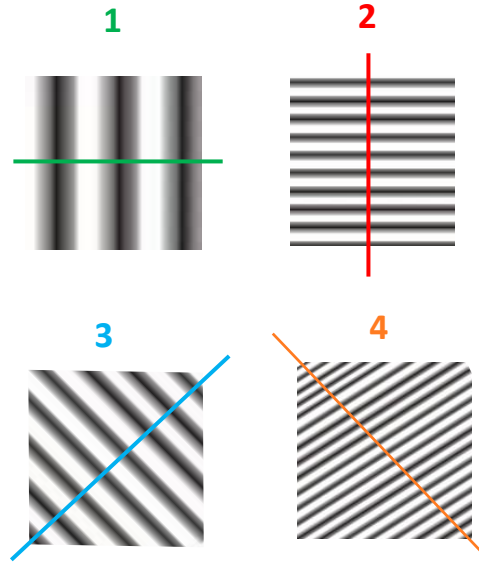


# II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

## I.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues

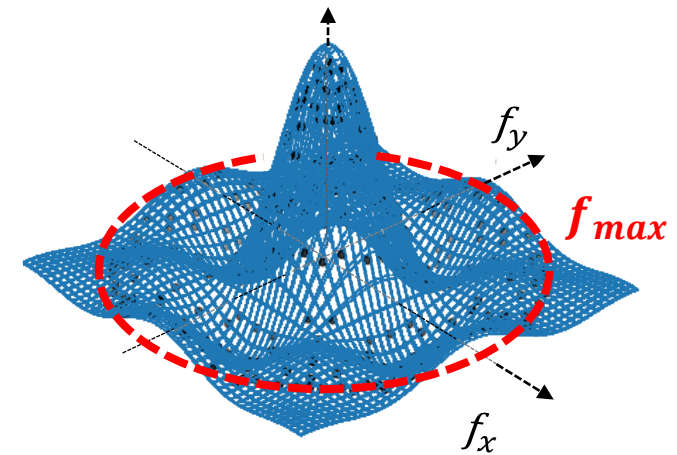


≡ Somme de 144 modulations spatiales unitaires



Interférogramme IDML 24 ordres

Discretisation de la fonction de transfert 2D en N points de mesures



## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

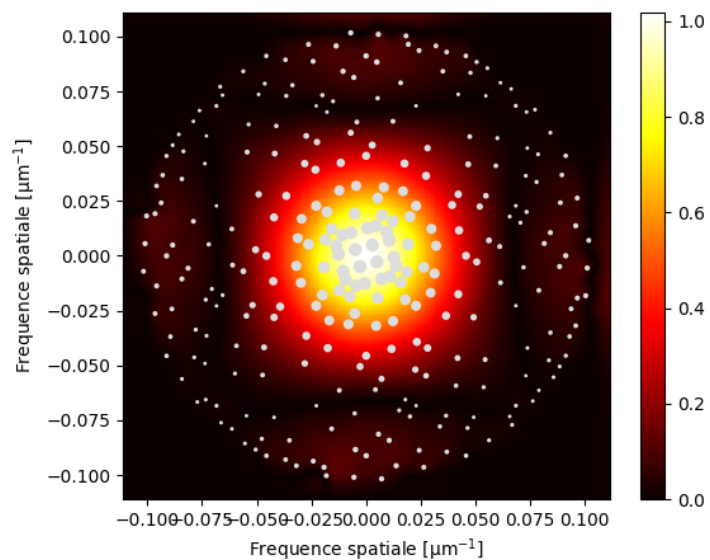
### 1.1 De l'IDML au CSIG ou comment générer des fréquences spatiales bien choisies et bien connues

Et la phase dans tout cela ?

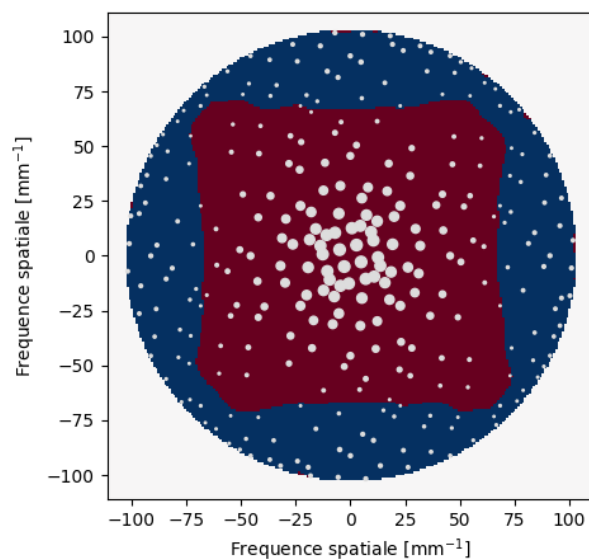
→ L'information donnée par la phase des harmoniques reste intéressante à 2 niveaux :

- Mesure exacte et facile de la taille pixel

Module de la fonction de transfert

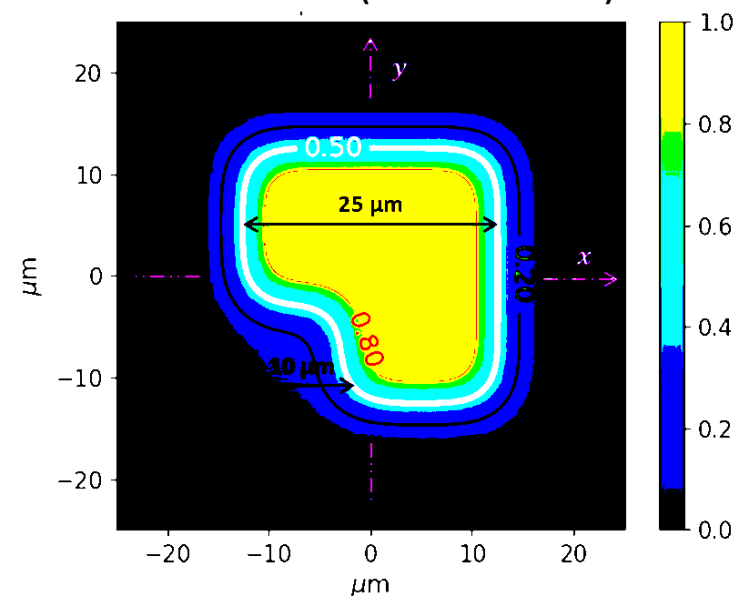


Phase de la fonction de transfert



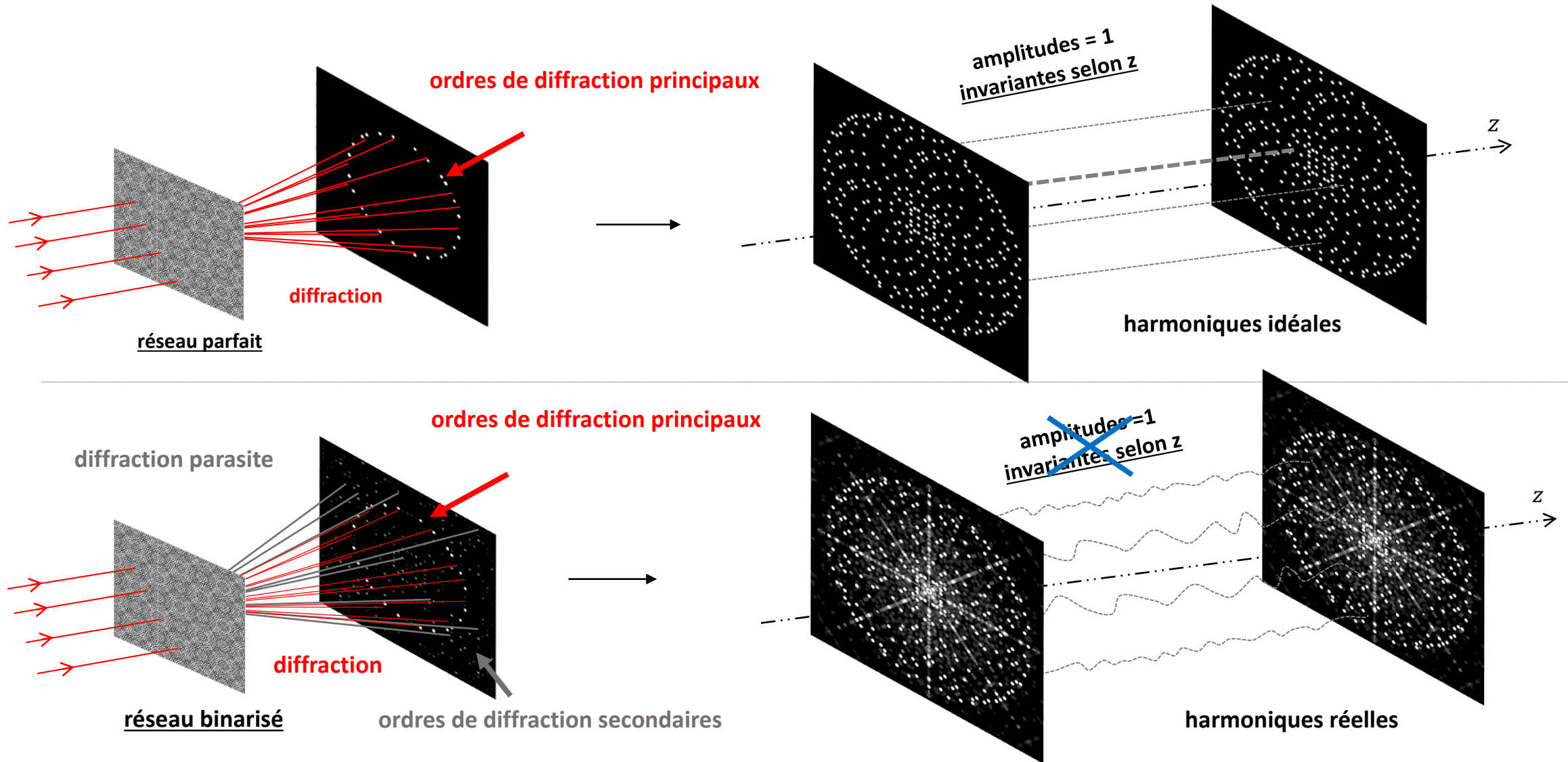
- Mesure de pixel non centro-symétriques

Pixel en L (PSF simulée)



# II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

## II.2 Non-invariance et nouvelles exigences sur les futurs réseaux de test



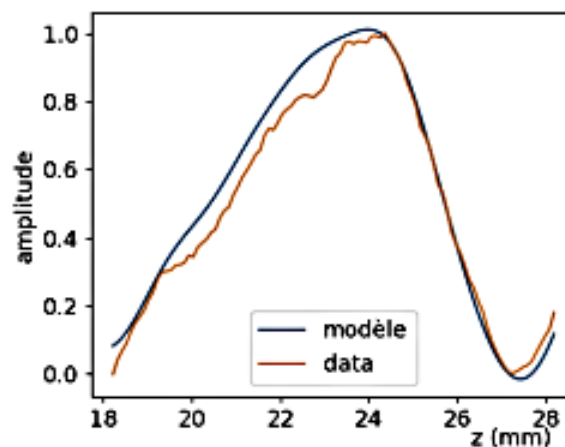
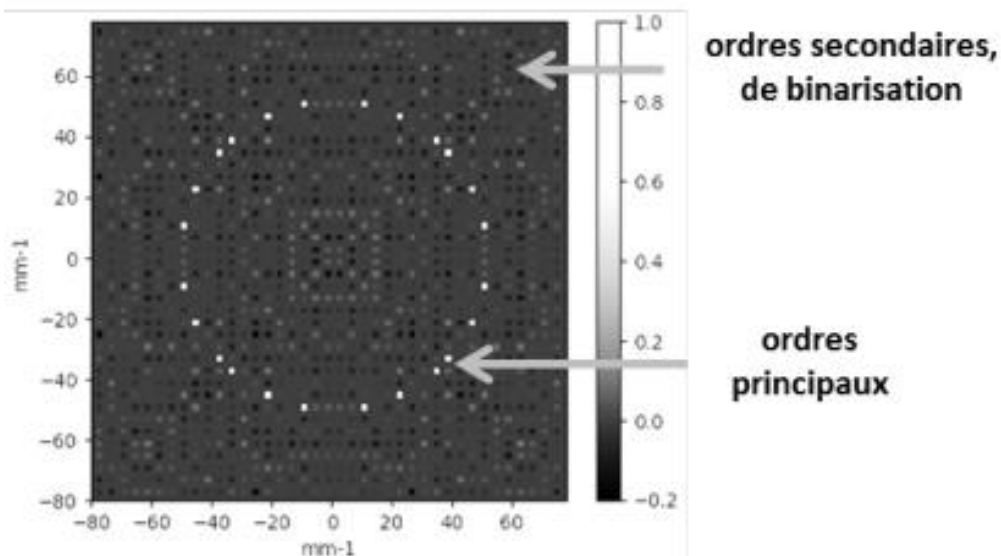
## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

### II.2 Non-invariance et nouvelles exigences sur les futurs réseaux de test

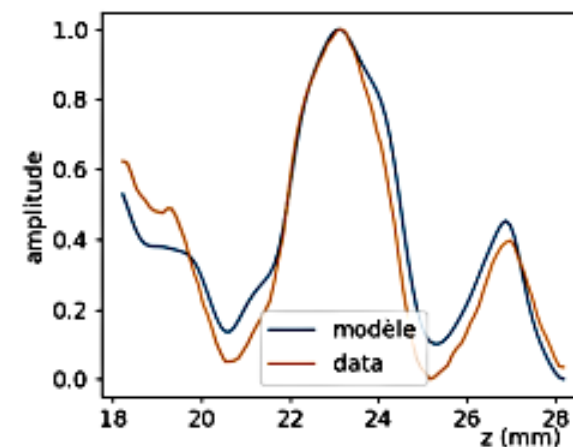
Ces variations d'amplitude des harmoniques sur l'axe optique sont :

- chromatiques
- différentes d'une harmonique à l'autre
- Prédicibles par simulation du réseau binarisé

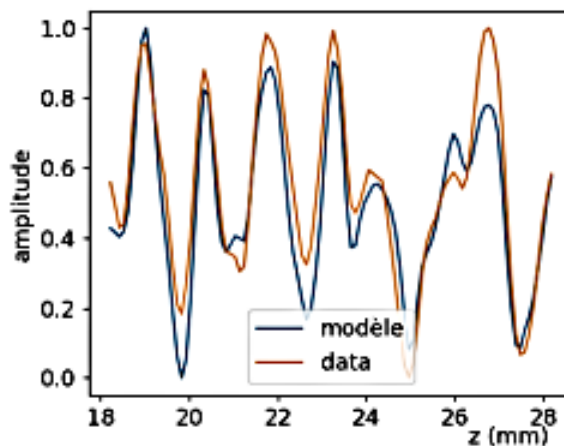
*Simulation de plusieurs milliers d'ordre parasite nécessaire...*



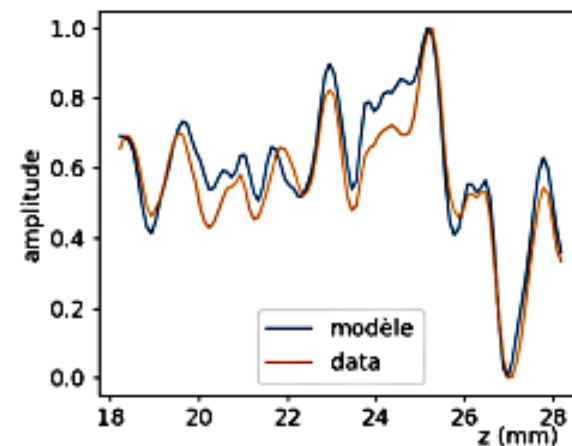
(a) Harmonique ( $\bar{p} = 2, \bar{q} = 2$ )



(b) Harmonique ( $\bar{p} = 4, \bar{q} = 6$ )



(c) Harmonique ( $\bar{p} = 8, \bar{q} = 14$ )



(d) Harmonique ( $\bar{p} = 12, \bar{q} = 12$ )

Données expérimentales et simulées pour quelques harmoniques en SWIR, sur une plage de 10 mm, source monochromatique à 1.55  $\mu\text{m}$

## II] l'IDML comme mesure métrologique directe de la fonction de transfert 2D des détecteurs matriciels

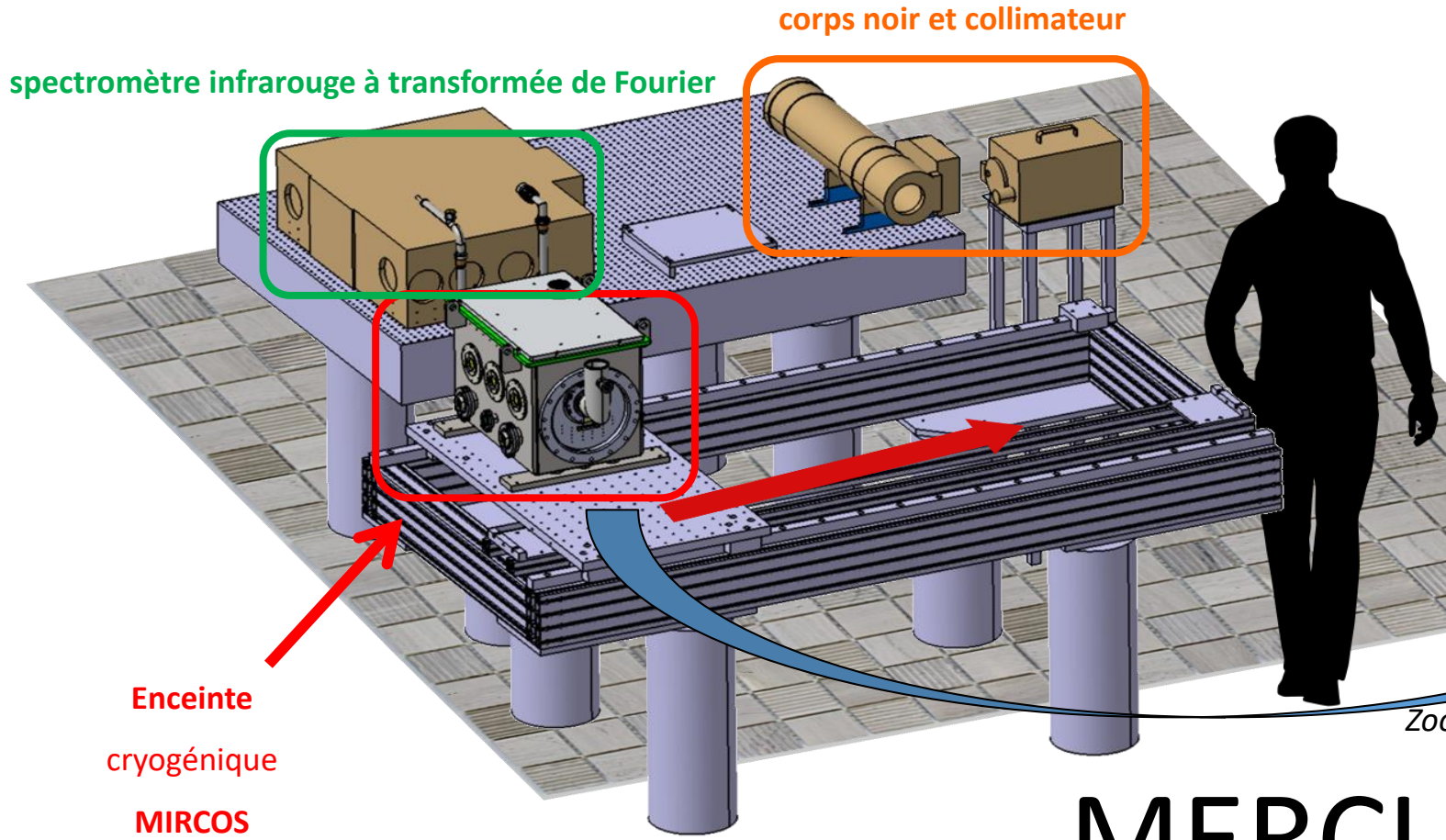
### *II.2 Non-invariance et nouvelles exigences sur les futurs réseaux de test*

Perte d'invariance des réseaux « CSIG » ~~Continuously~~ Self Imaging Grating

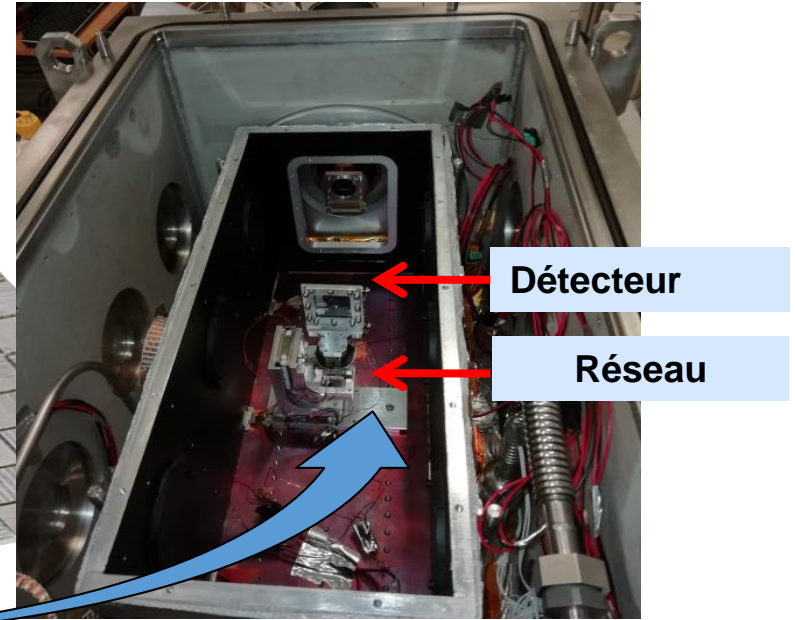


NOUVEAU PARADIGME

Vers de nouveaux réseaux IDML où l'invariance n'est plus nécessaire au sens strict du terme  
Et où les ordres « parasites » deviennent des ordres utiles à la mesure



plateforme MIRCOS



Zoom sur l'enceinte cryogénique

# MERCI de VOTRE ATTENTION

- *Financement astre*
- *Labex FOCUS*



# Session 2: Métrologie

*Chairwoman : Cindy Bellanger*

- *L'interféromètre 4 ondes comme étalon secondaire pour une mesure exacte des caractéristiques spatiales et radiométriques des détecteurs infrarouge. **Edouard Huard**, ONERA*
- *Le diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser avec pupille segmentée par interférométrie à décalage multilatéral PISTIL. **Bastien Rouzé**, ONERA*





RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

# Diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser par interférométrie PISTIL

**Bastien Rouzé,**

ONERA, Département DOTA – Sources laser & systèmes LiDAR

**1ere rencontre  
d'Interférométrie à  
Décalage MultiLatéral**

**11 et 12 mai 2023**

**DIGITEO Saclay**

CEA Saclay, Bâtiment 565, 91191 Gif-sur-Yvette



# Partie I

## Diagnostic des systèmes de **combinaison cohérente de sources laser** par interférométrie PISTIL

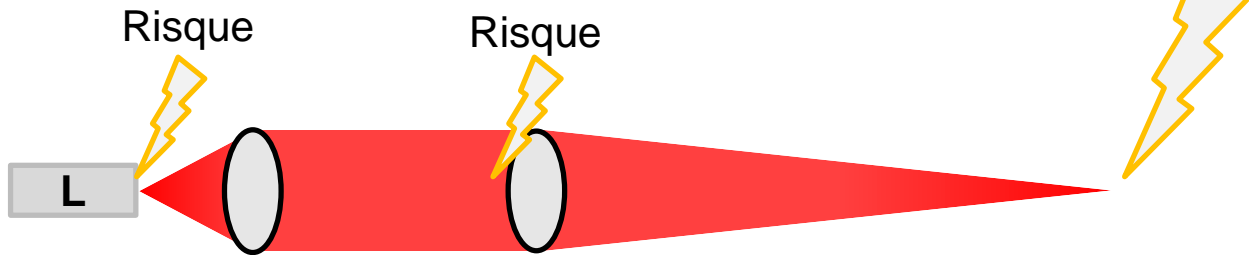
# D'un laser...

+ forte puissance

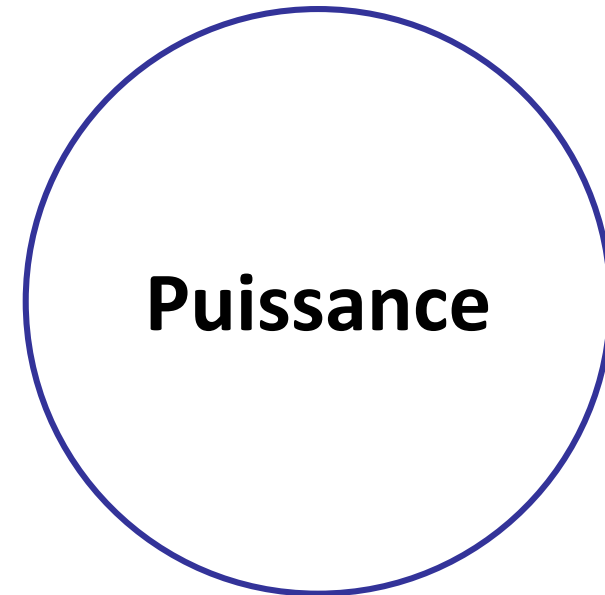
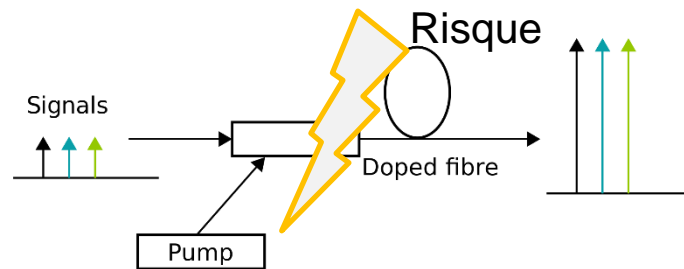
=

+ de problèmes (optique non linéaire, destruction du matériel)

Risque

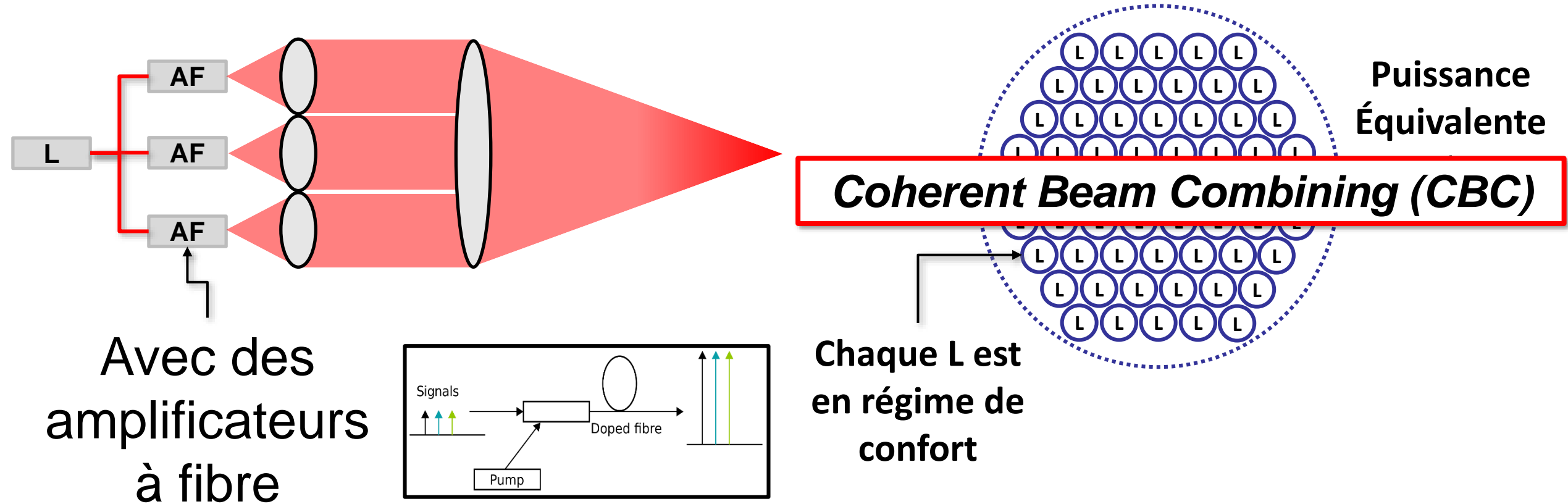


Avec possiblement un ampli  
fibré custom



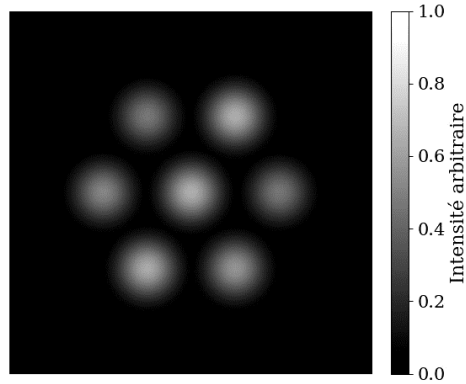
# ... à la combinaison cohérente de plusieurs sources

...Faire la somme de  
N sources laser ...

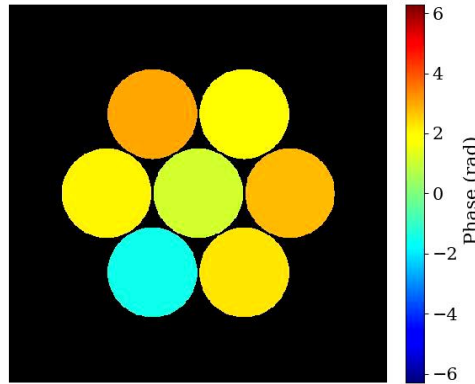


# Combinaison cohérente de sources laser

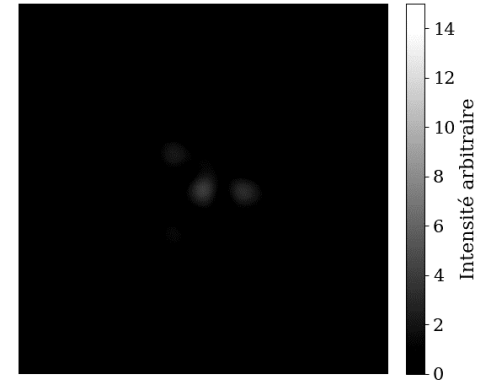
Boucle  
Ouverte  
(BO)



Champ proche



Phase

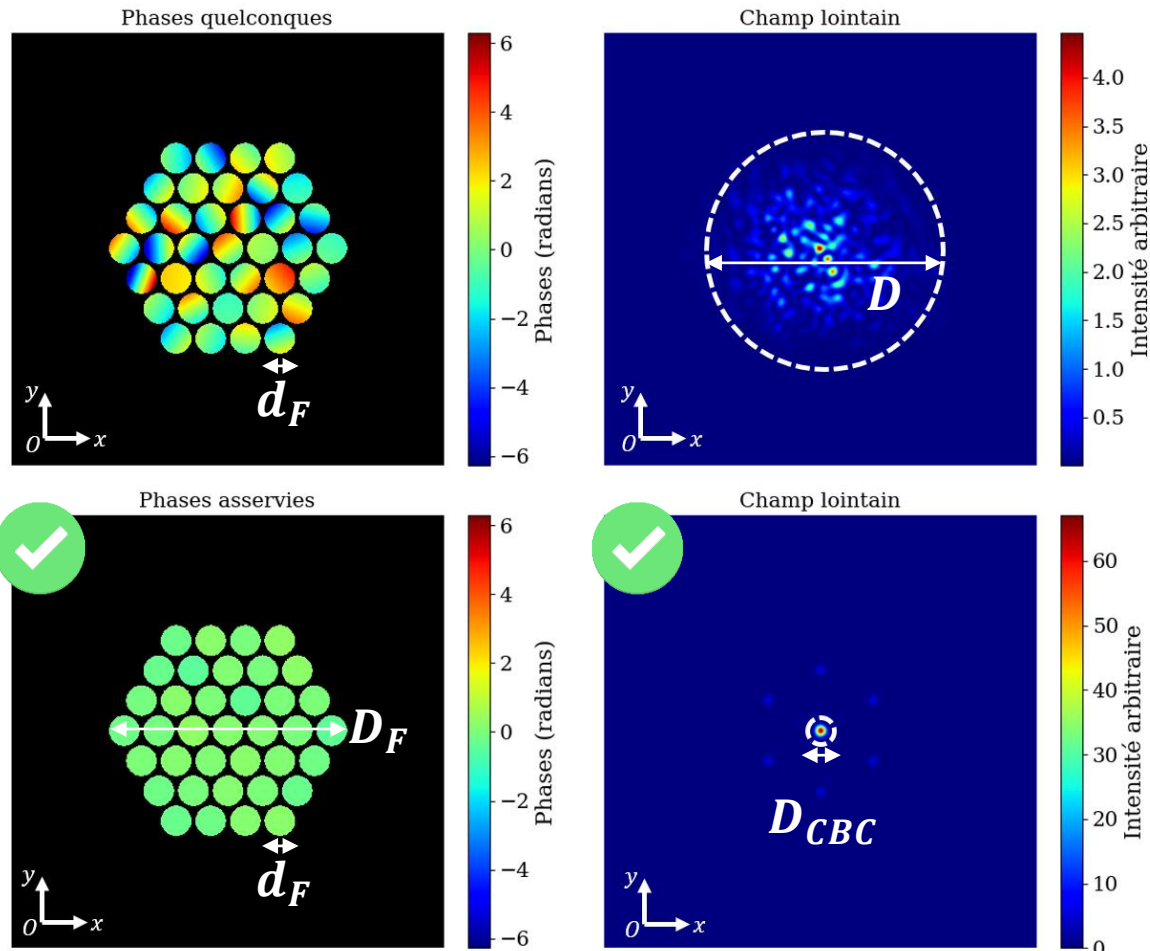


Champ lointain

Tavelures,  
Instable

Phase résiduelle =  $2\pi/20$  radians  
 $\lambda/20$  unité de longueur d'onde

# Les paramètres clefs de la CBC



Augmentation de **Puissance**

$$P_{CBC} \approx \eta \times N \times P_F$$

Augmentation de la **Densité de Puissance**

*Localité du champ lointain*

$$D \propto 1/d_F$$

$d_F$ : largeur fibre

$$D_{CBC} \propto 1/D_F$$

$D_F$ : largeur réseau

Stabilité de la combinaison en champ lointain

**Variations phases**  $\Rightarrow$  **Champ lointain**

Ex:  $\lambda/50$  RMS

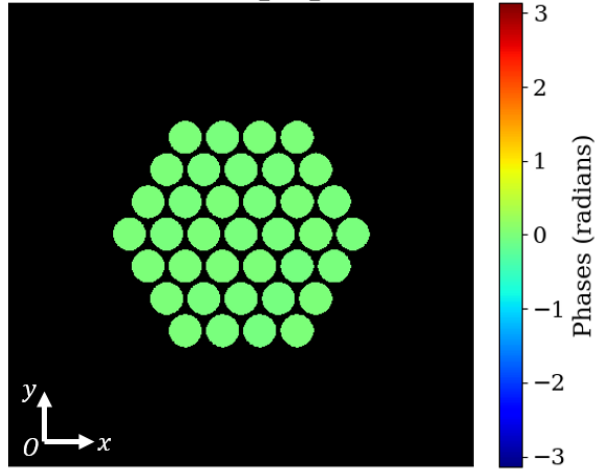
$\Rightarrow$

**Stable**

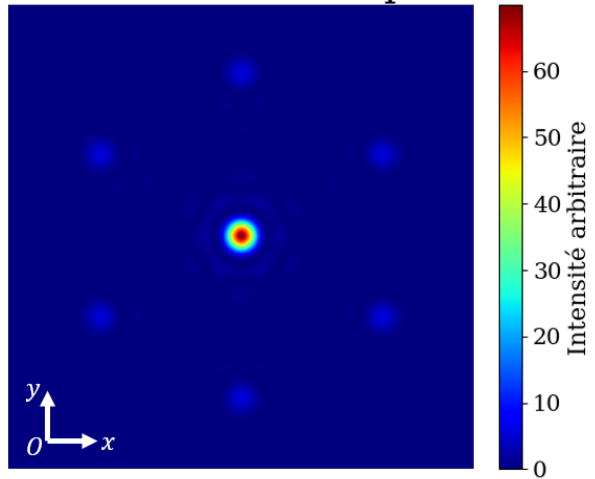
# Piano des phases



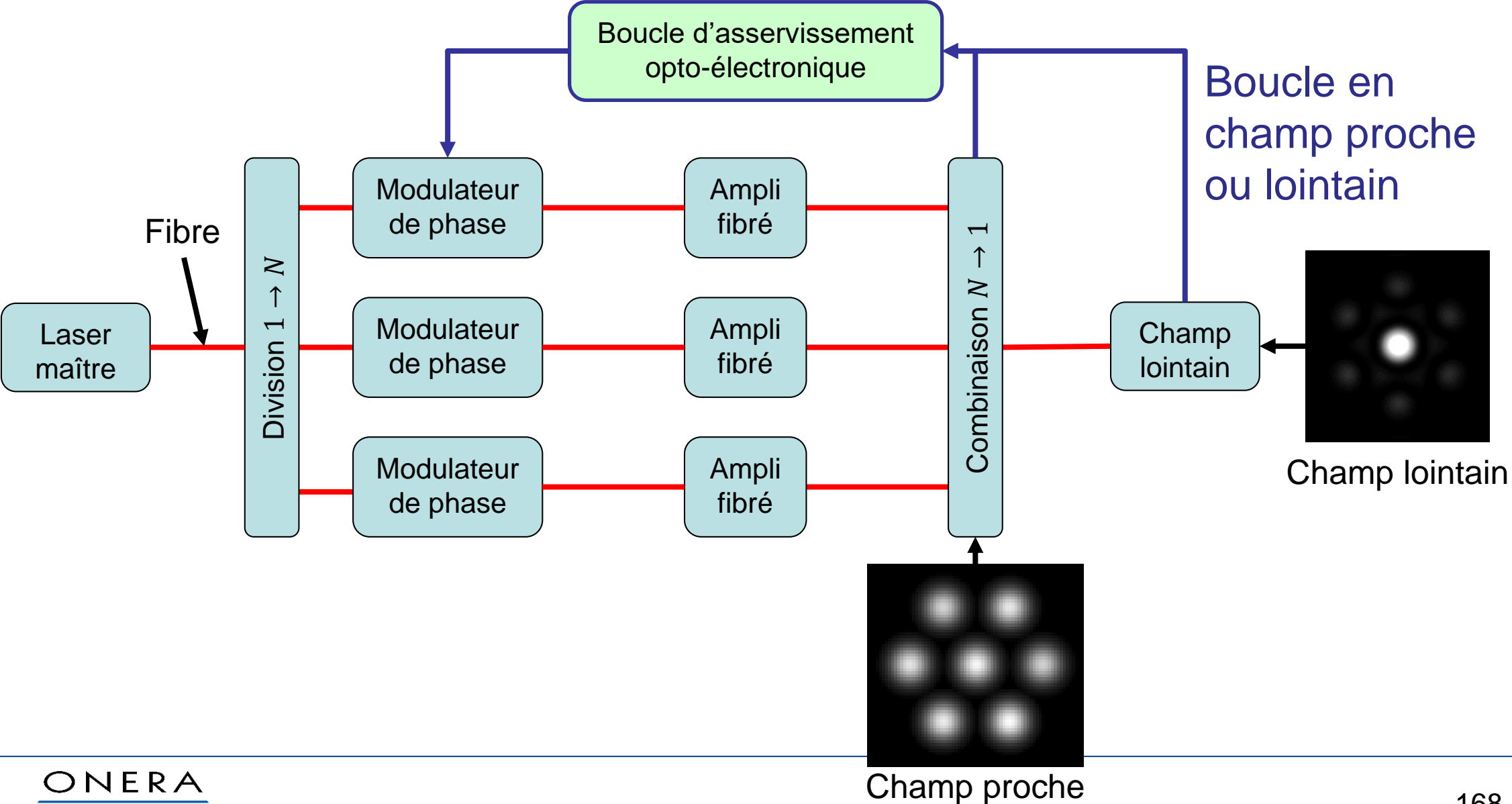
Surface équiphas



Motif CBC classique



# Architecture typique d'un laser CBC

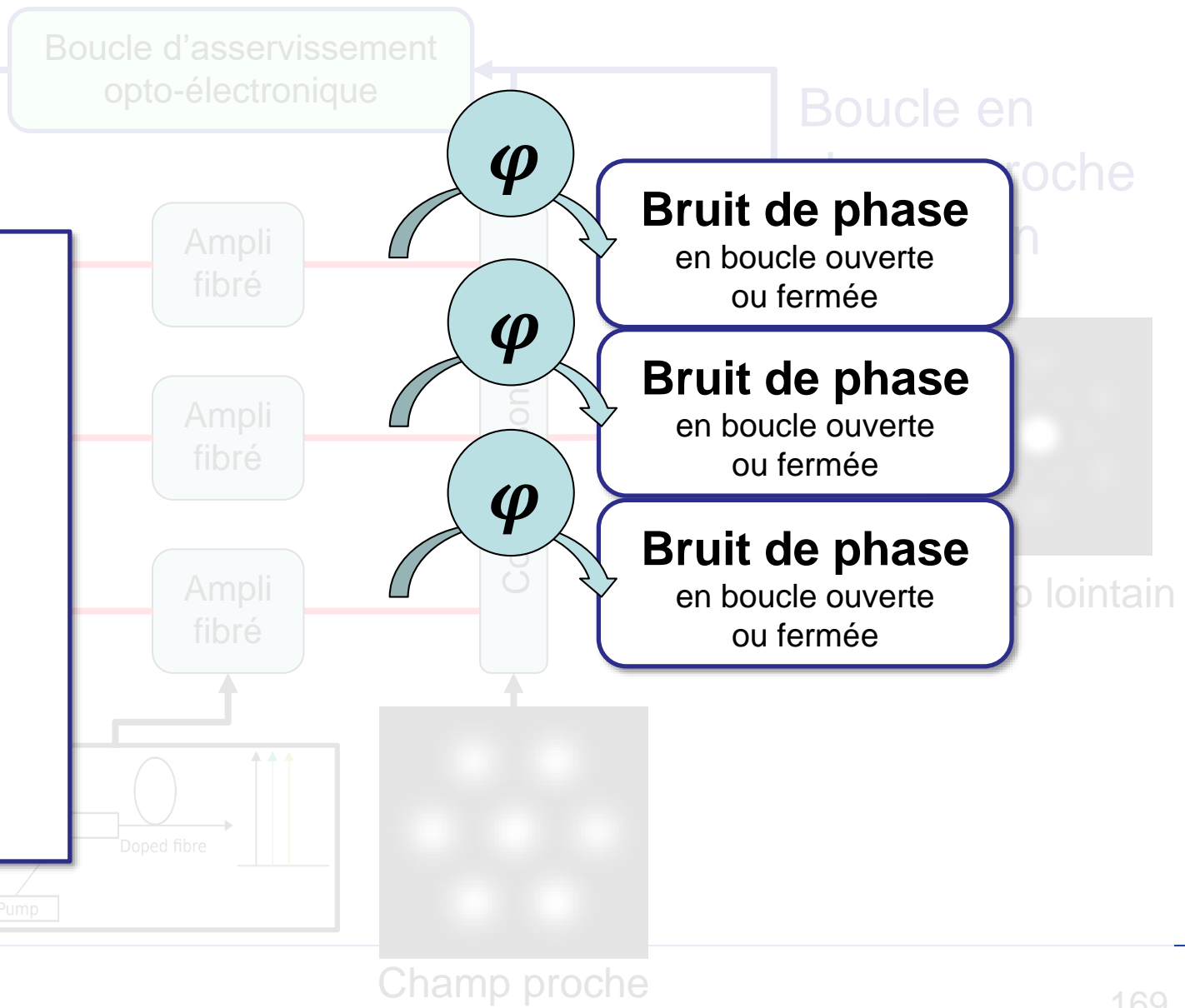




# Un système complexe...

## Questions essentielles...

- **Combien de faisceaux ?**
- **Quel contrôle des phases (/ tips et tilts, retards des faisceaux...)?**
- **Quels sont les bruits ?**
- **Comment aligner le laser CBC ?  
Comment vérifier le bon fonctionnement du matériel ?**



# Un système complexe... a besoin d'un diagnostic simple

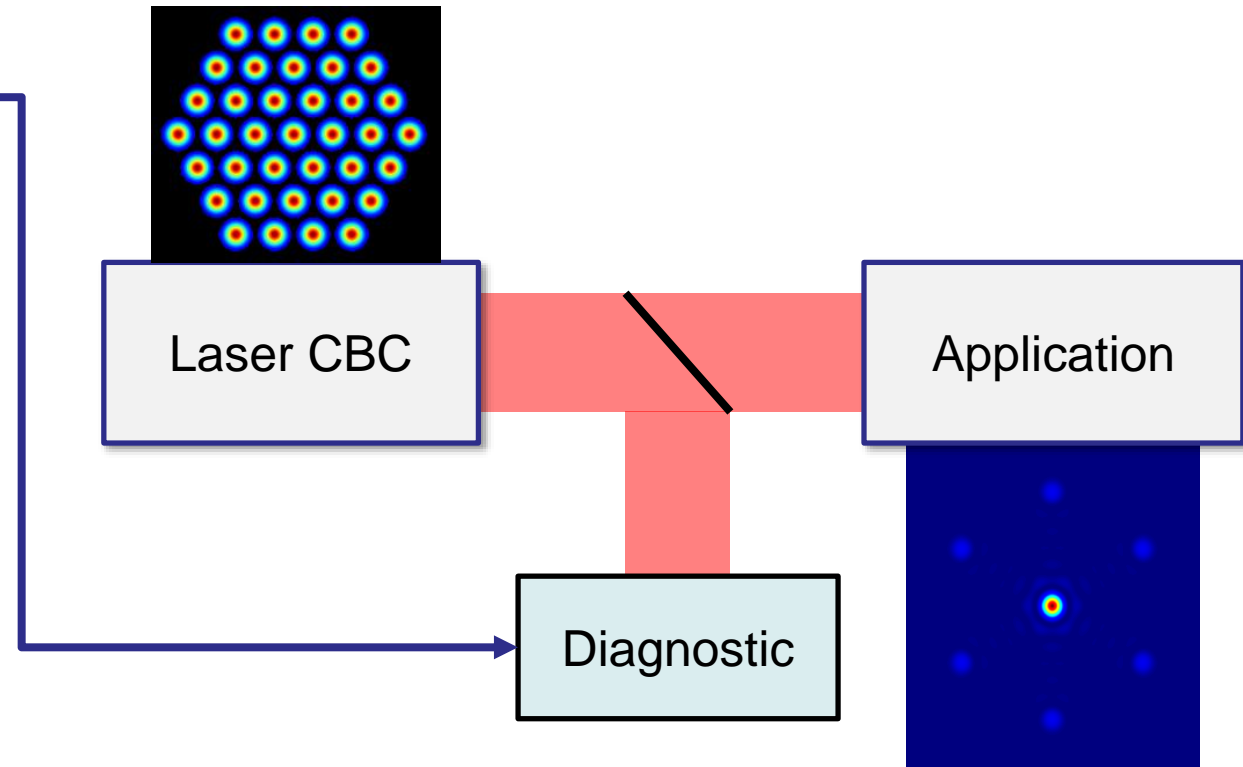
## Diagnostic pour accompagner l'utilisateur

Mesurer les N bruits de phases en même temps y compris du tip/tilt

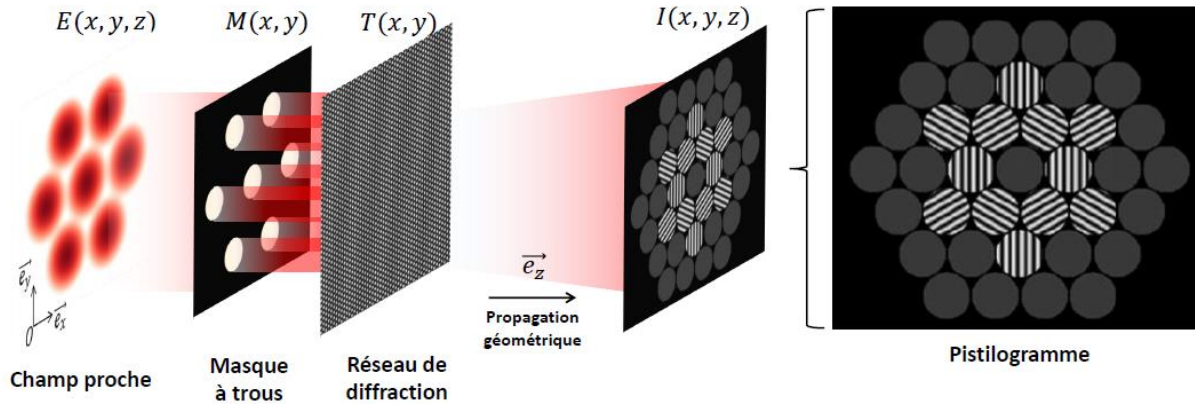
Qualité métrologique: mesures haute fidélité

*Sachant que les qualités de boucles sont de  $\lambda/50$  RMS*

Ne soit pas dépendant du laser CBC

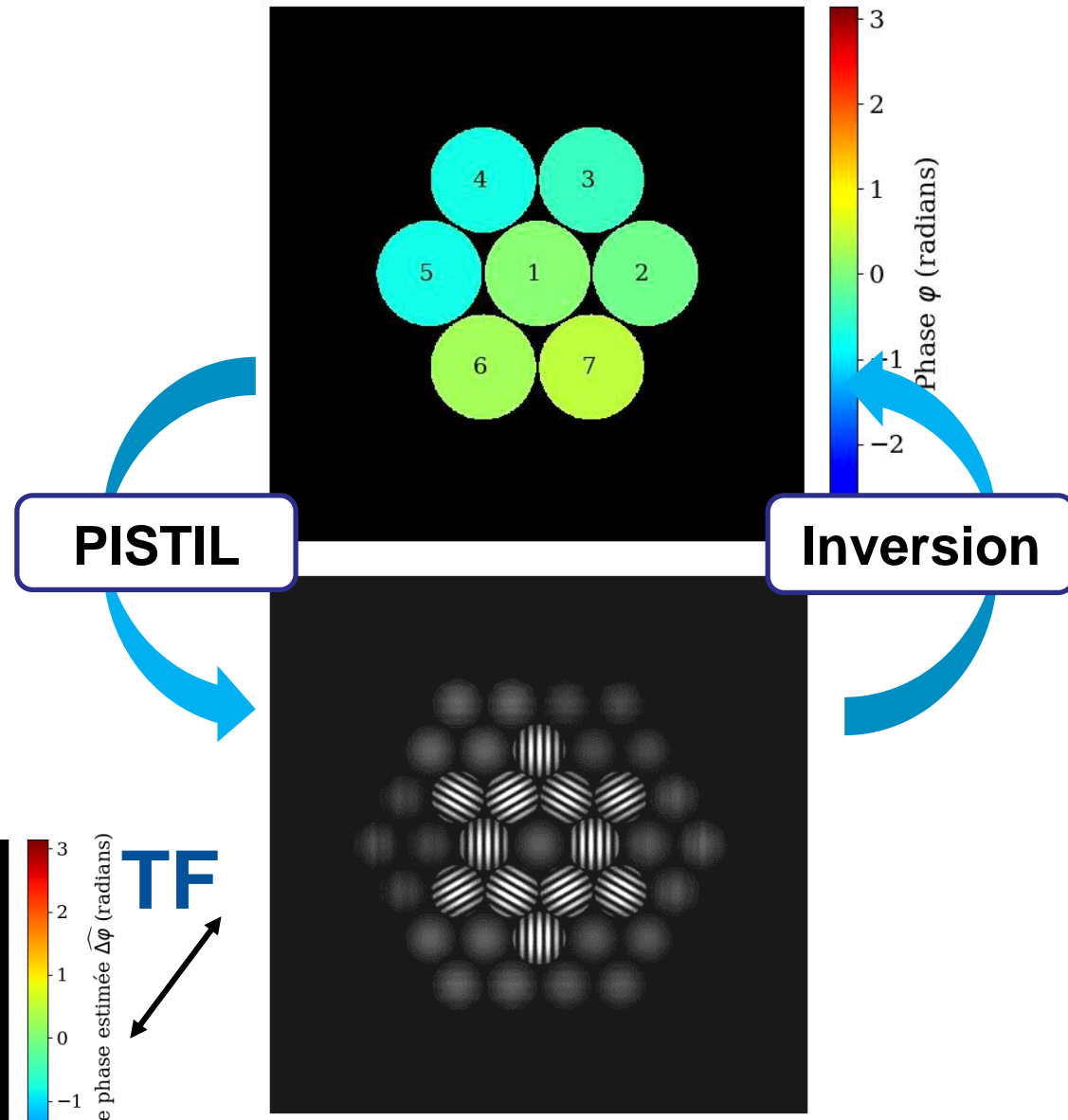
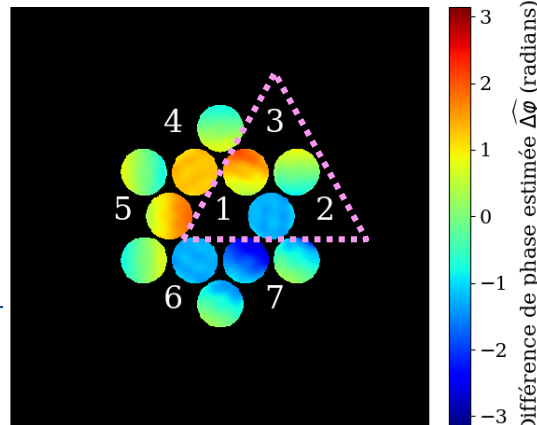


# Solution diagnostic: PISTIL



Mesurande	Grandeur mesurée
Phases	Déplacement des franges
Tips/tilts individuels	Fréquences des franges

**Contrôle de l'erreur** par les relations de clôture des différences de phase  $\gg$  **typ.  $\lambda/200$** .  
Idem Tip/tilt  $\gg$   $\mu\text{rad}$ .



# Partie II

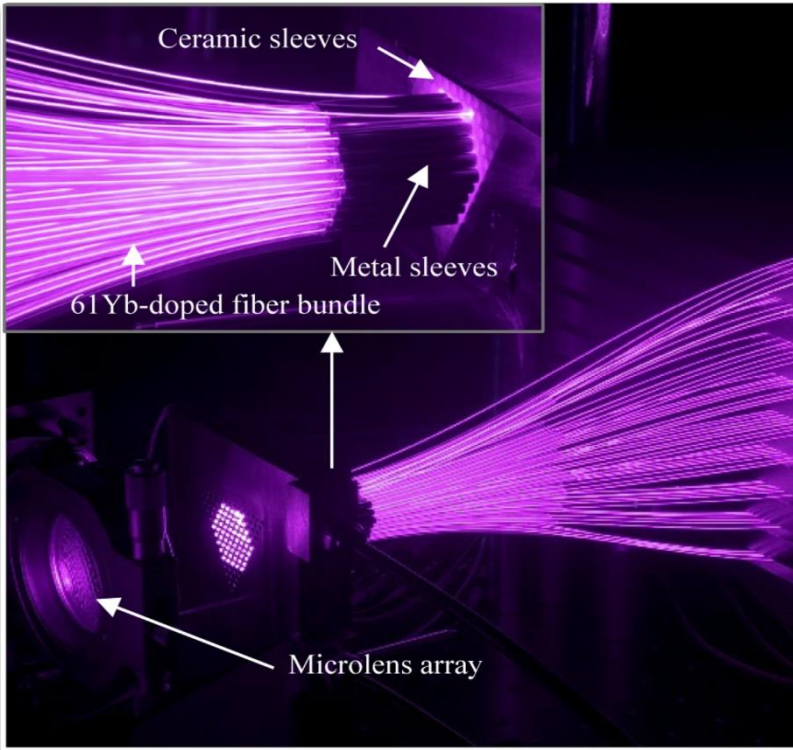
## Diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser par interférométrie PISTIL

# Applications pour les diagnostics

**LASBE**  
(Onera-SLS)

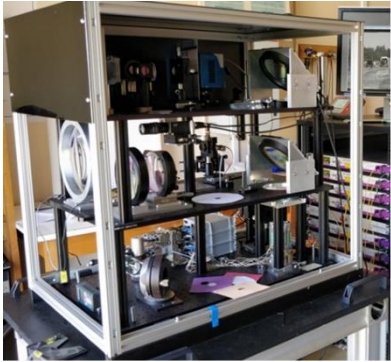


**XCAN**  
(Polytechnique/Thales)



# Applications pour les diagnostics

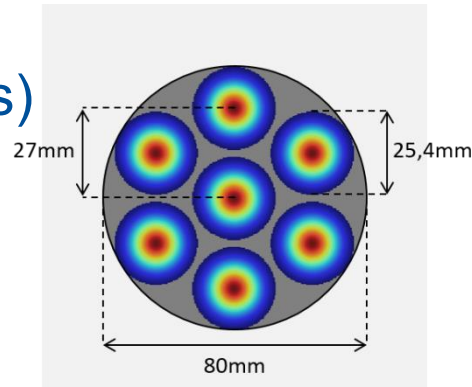
## LASBE (Onera-SLS)



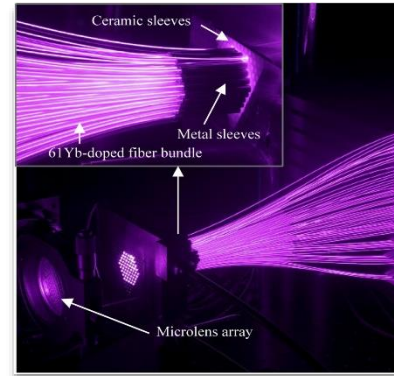
N = 7 faisceaux  
Maille hexagonale  
 $\lambda = 1545 \text{ nm (CW)}$   
Taille de pupille = 8 cm

Système compact  
(1x1x1.5m3 + baie d'amplis)

Toute situation  
(labo, extérieur, été, pluie)



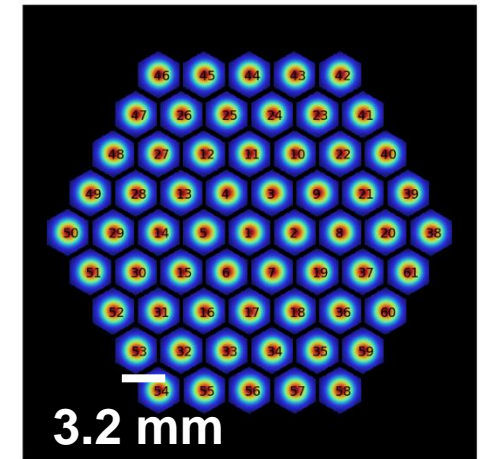
## XCAN (Polytechnique/Thales)



N = 61 faisceaux  
Maille hexagonale  
 $\lambda = 1032 \text{ nm (fs)}$   
Taille de pupille < 3 cm

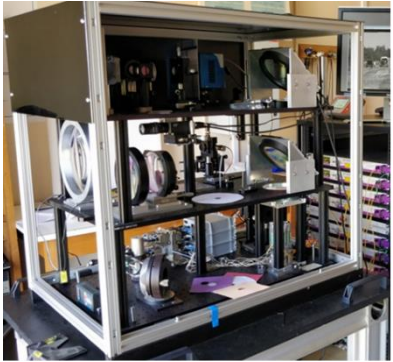
Système laboratoire  
(1 salle labo)

Salle blanche  
Régulation température  
Isolation de la table optique



# Applications pour les diagnostics

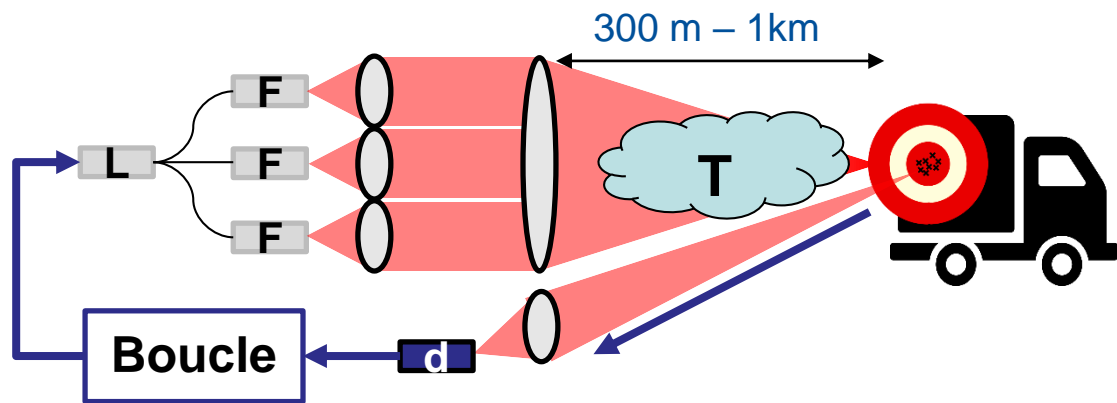
## LASBE (Onera-SLS)



N = 7 faisceaux  
Maille hexagonale  
 $\lambda = 1545$  nm  
Taille de pupille

Mise en phase  
avec cible dans la boucle

**Echantillon de candidats  
représentatif des lasers CBC  
dans le monde!**

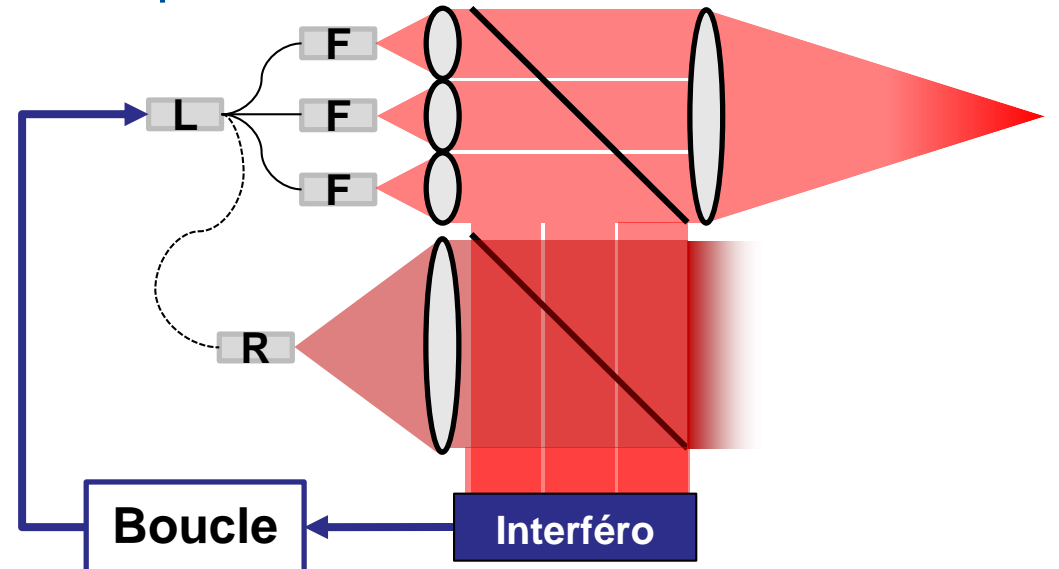


## XCAN (Polytechnique/Thales)

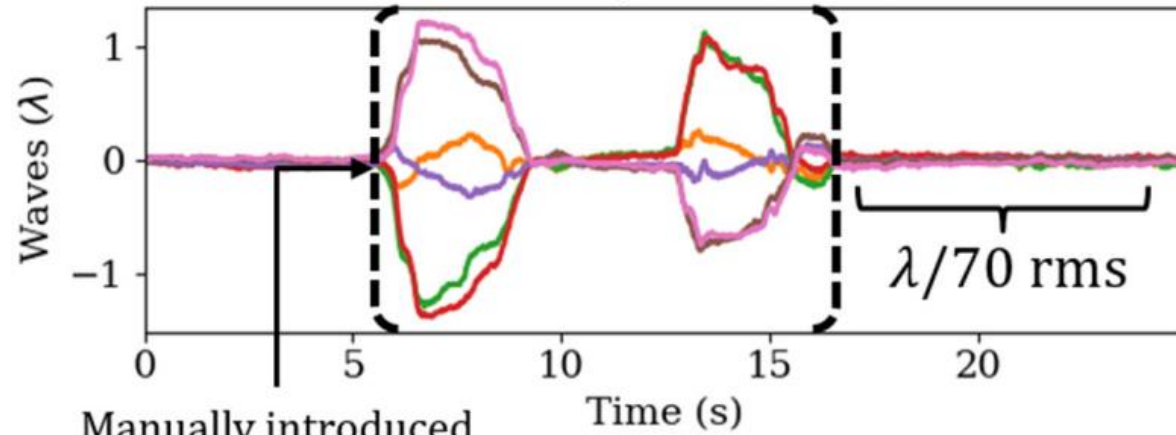
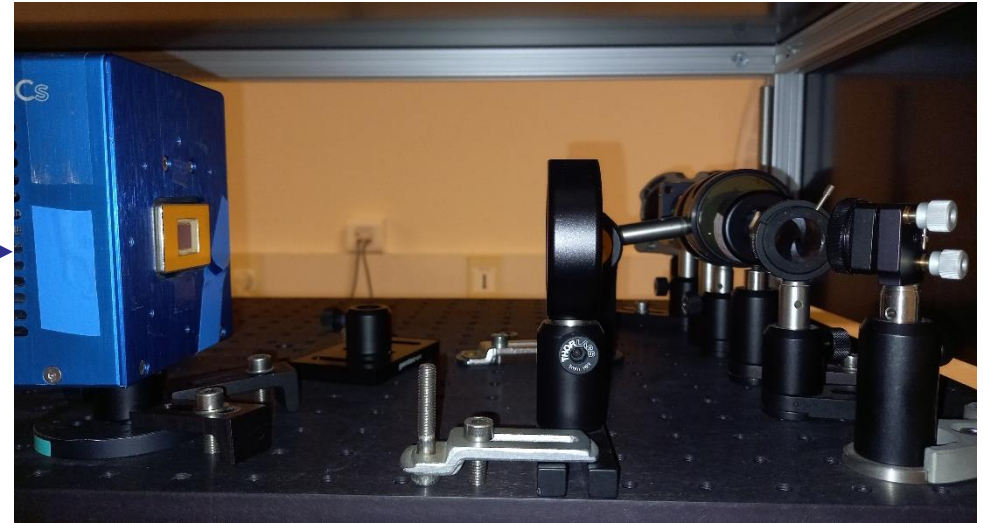
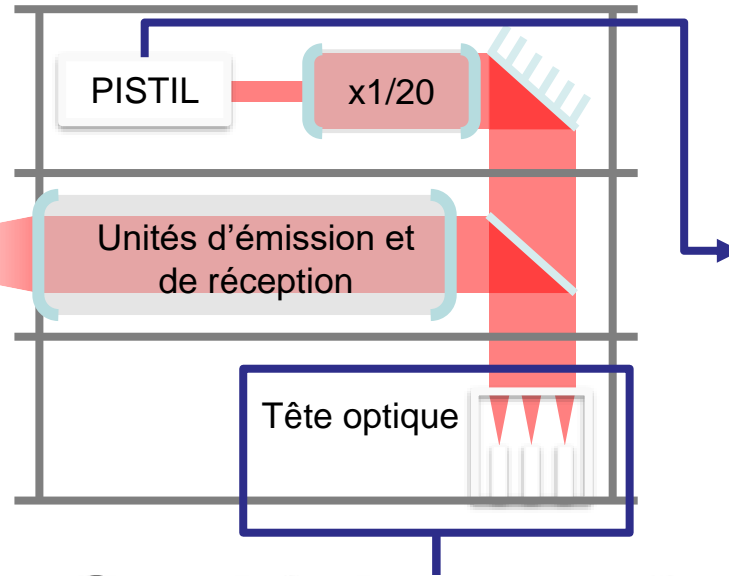
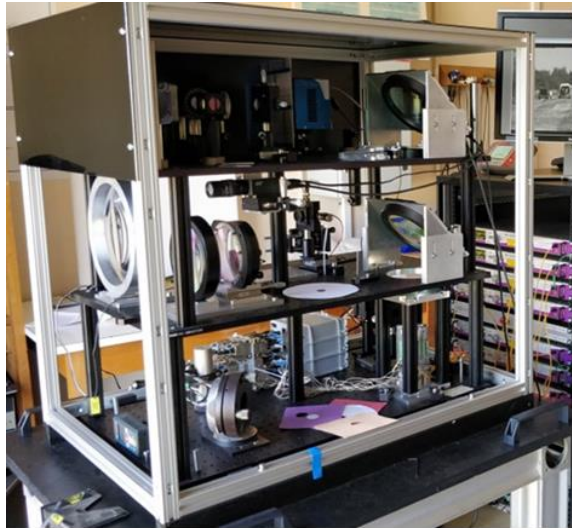


N = 61 faisceaux  
Maille hexagonale  
 $\lambda = 1032$  nm (fs)  
Taille de pupille < 3 cm

Mise en phase  
par interférométrie référencée



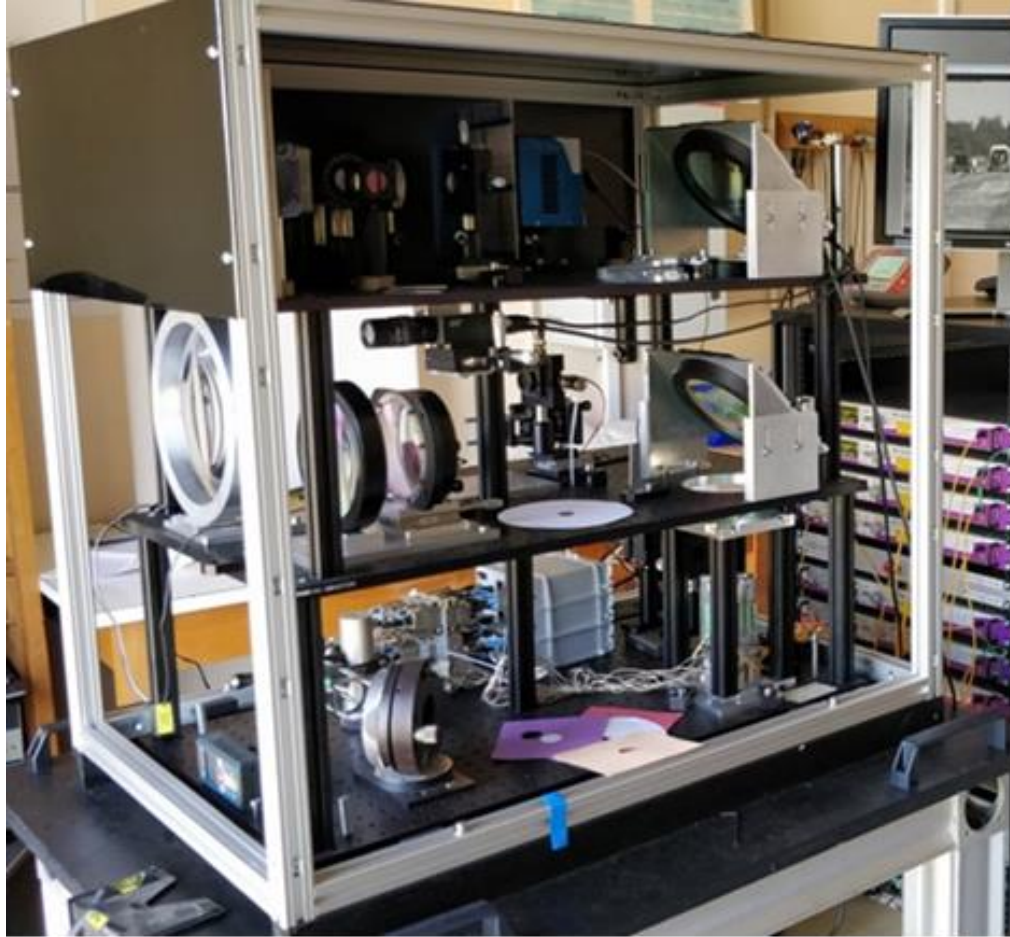
# Exemples de diagnostics sur LASBE



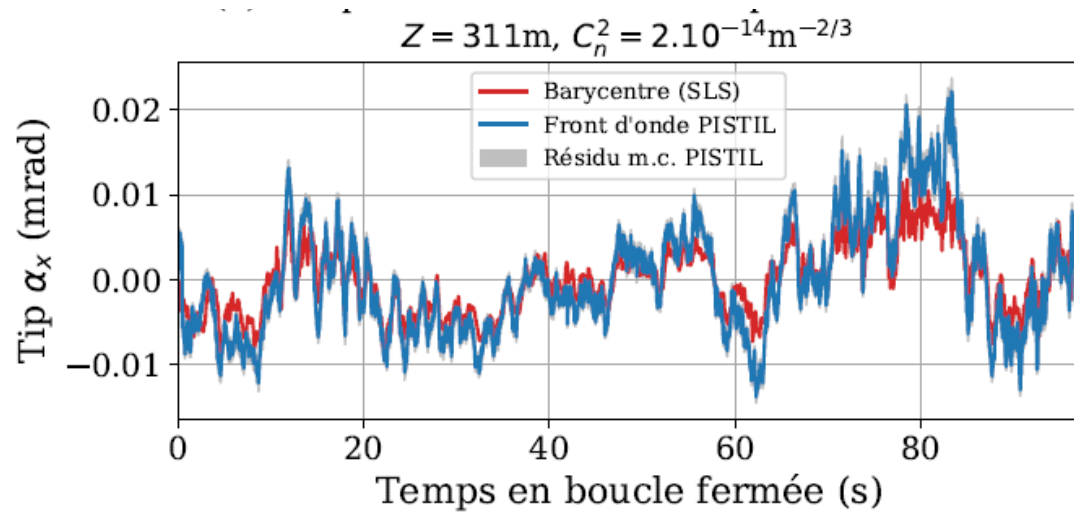
Manually introduced  
perturbation



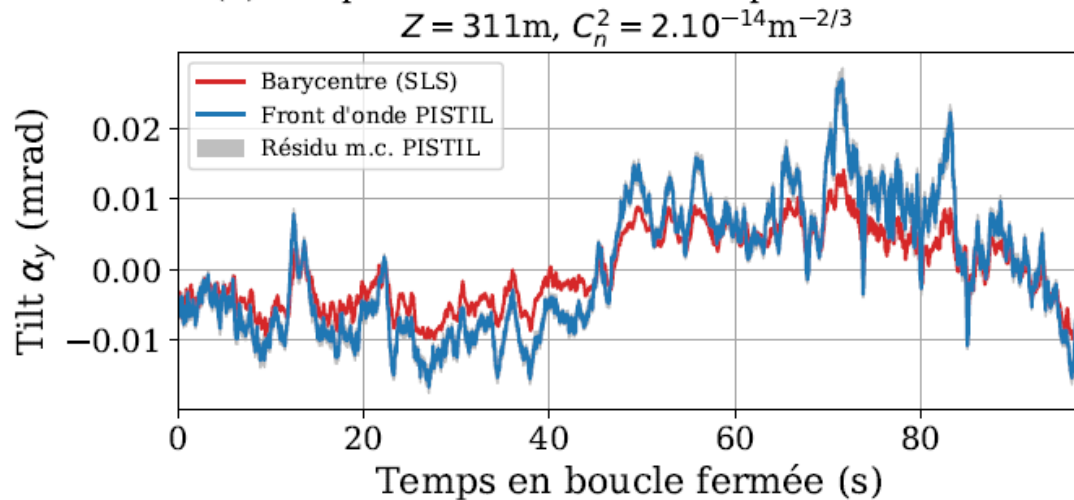
# Caractérisation en champ proche d'un effet de turbulence



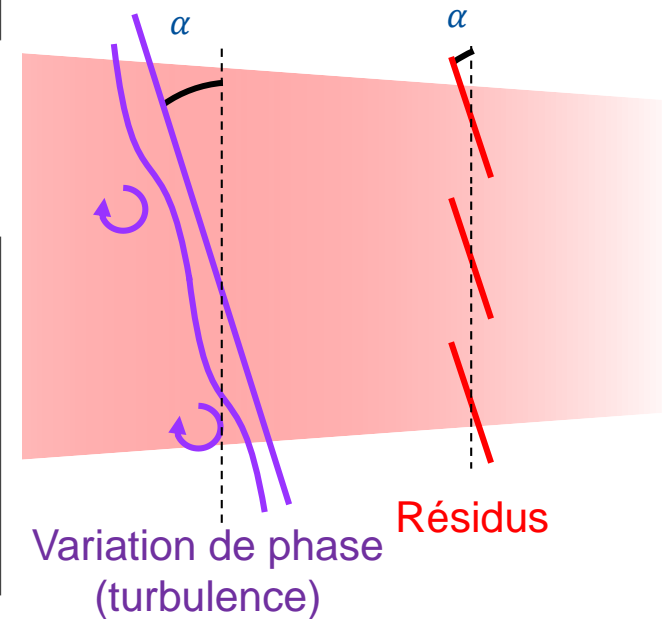
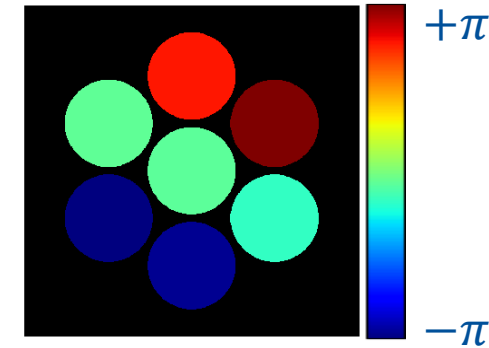
# Caractérisation en champ proche d'un effet de turbulence



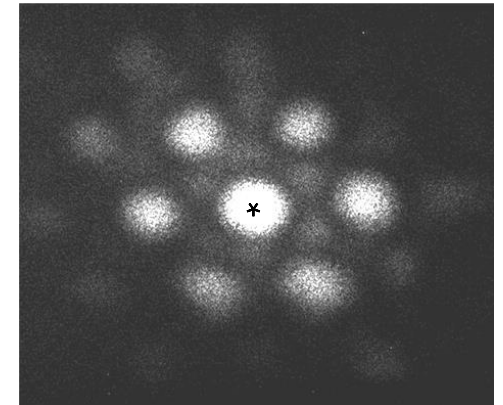
(b) Comparaison des calculs du tip de la turbulence



Basculement de phase vue par PISTIL



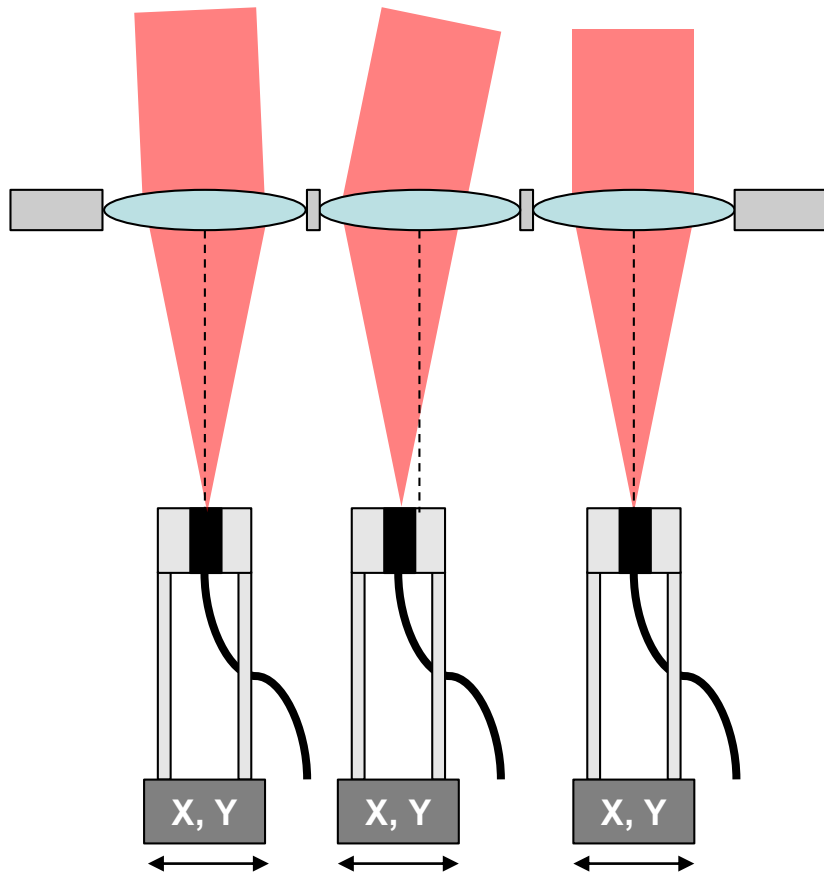
Champ lointain



Fuite de puissance du lobe central

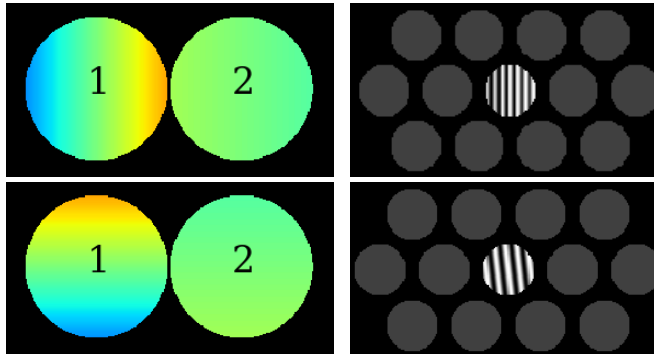
# Aide à l'alignement de la tête optique

Faisceaux collimatés à aligner

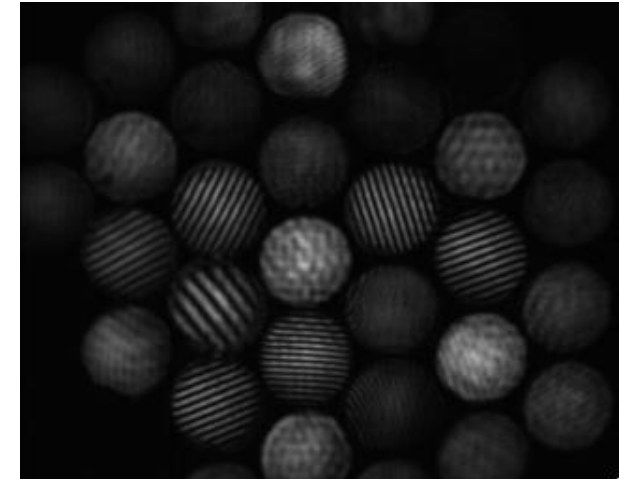


Platines de positionnement X, Y  
des fibres

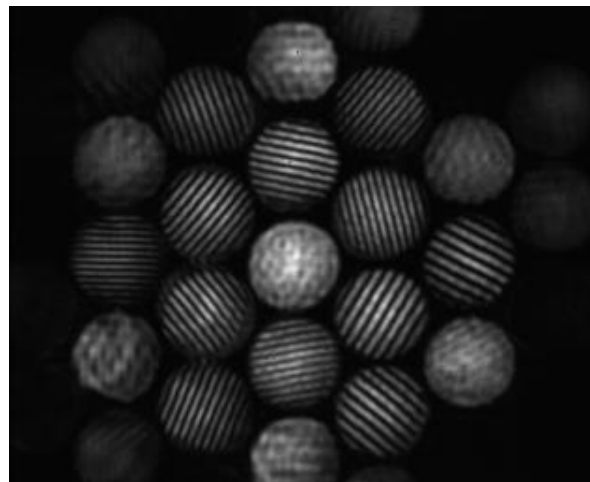
Tip/tilt dans un Pistilogramme



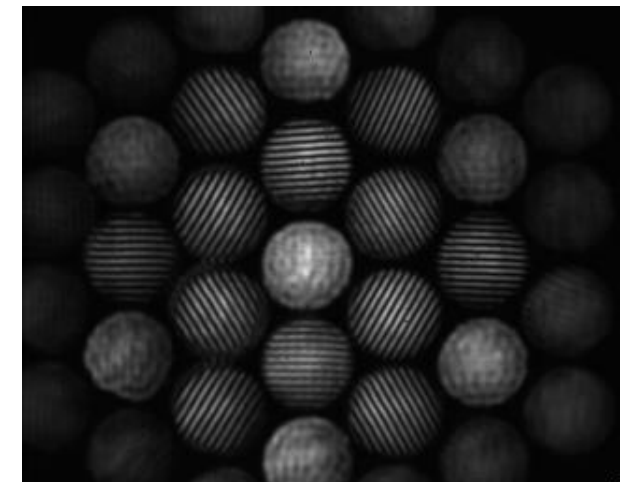
1/ Faisceaux hors axes



2/ Alignement en cours à l'oeil



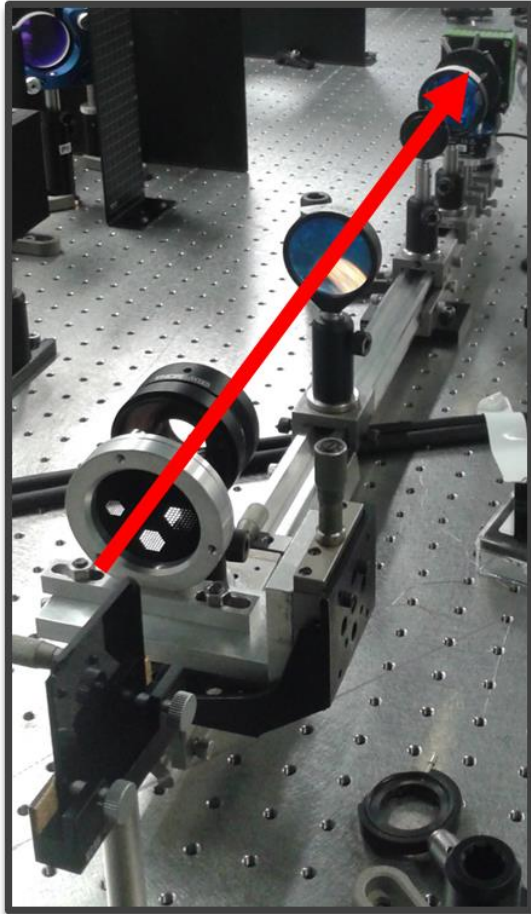
3/ Alignement fin en soft



# Conclusion partielle

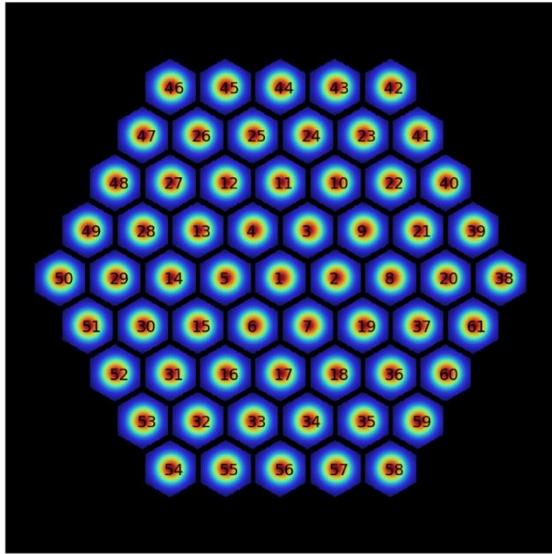
- **Diagnostic possible avec IDML PISTIL compatible avec les surfaces d'ondes segmentées, application sur LASBE**
  - Mesures de N phases en boucle fermée labo (variations de +/-  $\lambda/70$  mesurées à  $\lambda/252$ )
  - Mesures de N phases en boucle fermée extérieur → présence du basculement de la turbulence & caractérisation champ proche & lointain
  - Aide à l'alignement de la tête laser par mesure des tips/tilts individuels

# Exemples de diagnostics sur XCAN



*miniPISTIL sur XCAN*

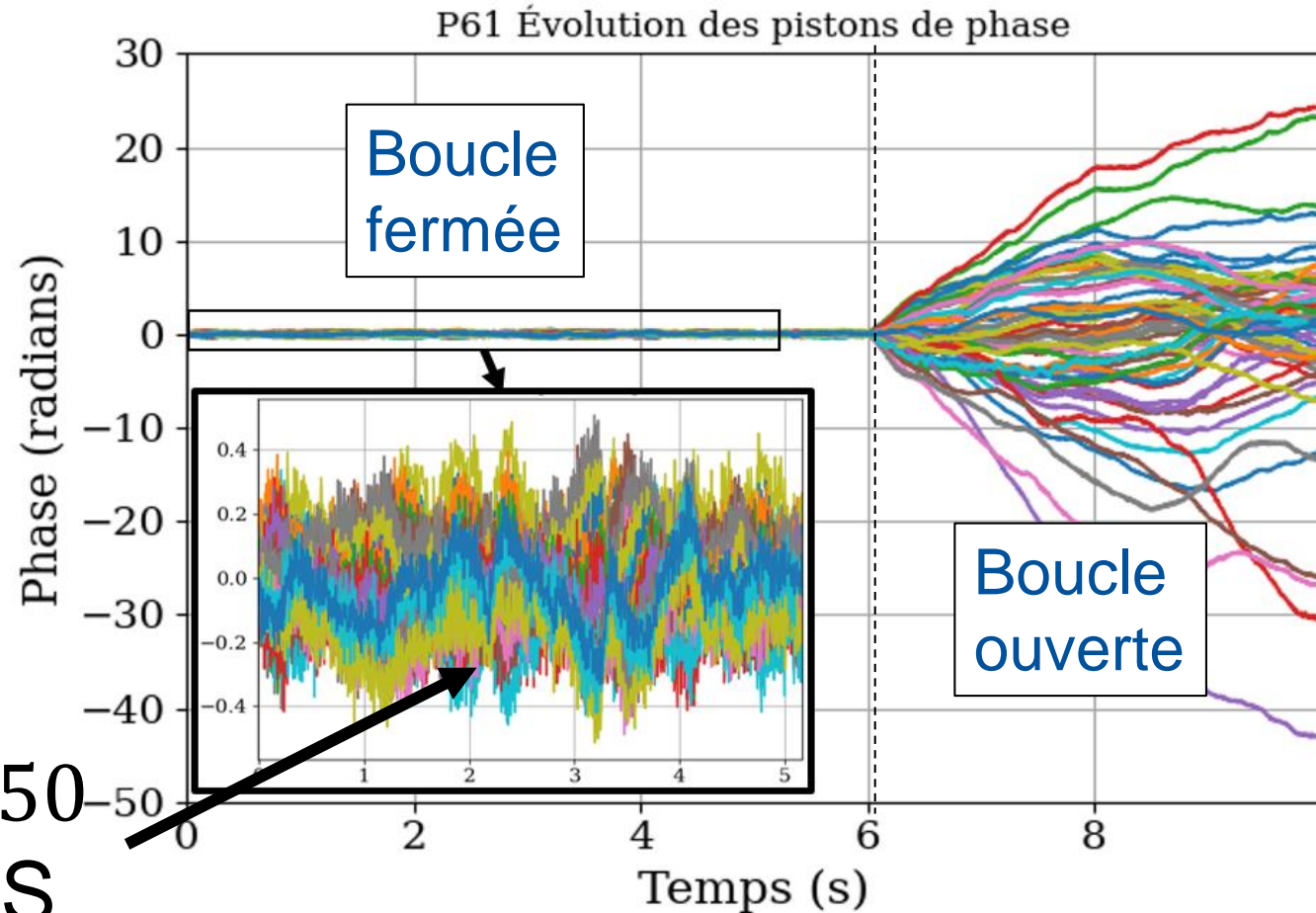
# Mesures en boucle fermée et ouverte



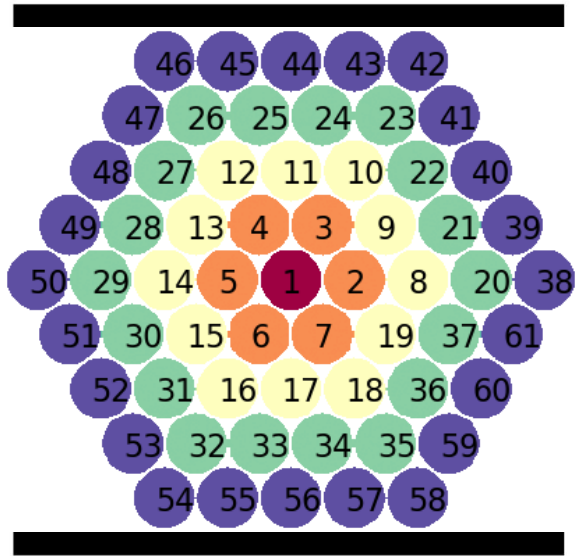
Validation boucle fermée à  $\lambda/50$  RMS pour différents régimes de puissance moyenne pupille:

20 W, jusqu'à 760 W  
Cadence 55 MHz ou 429 kHz

$\lambda/50$   
RMS

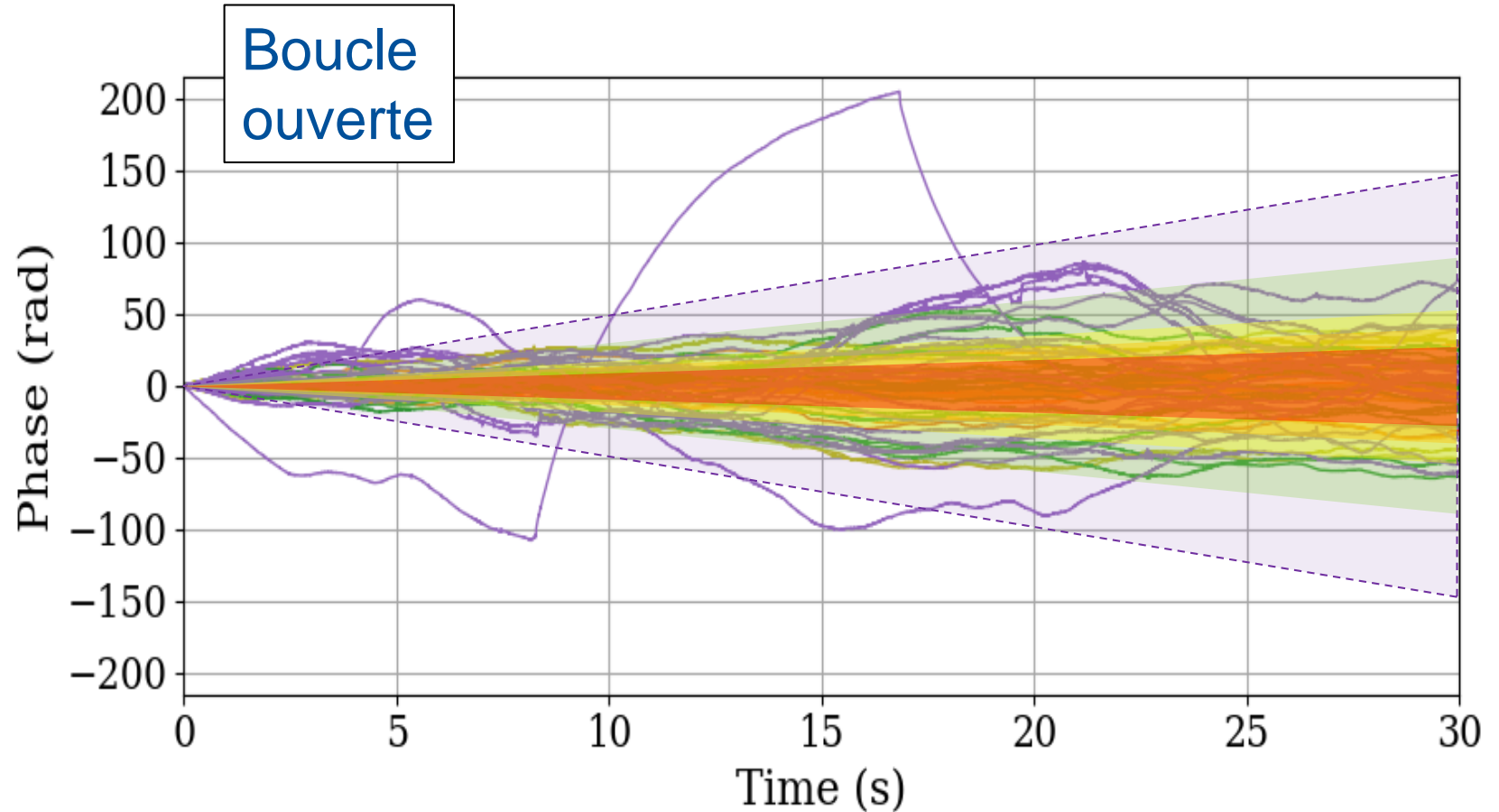


# La caractérisation simultanées de plusieurs amplis

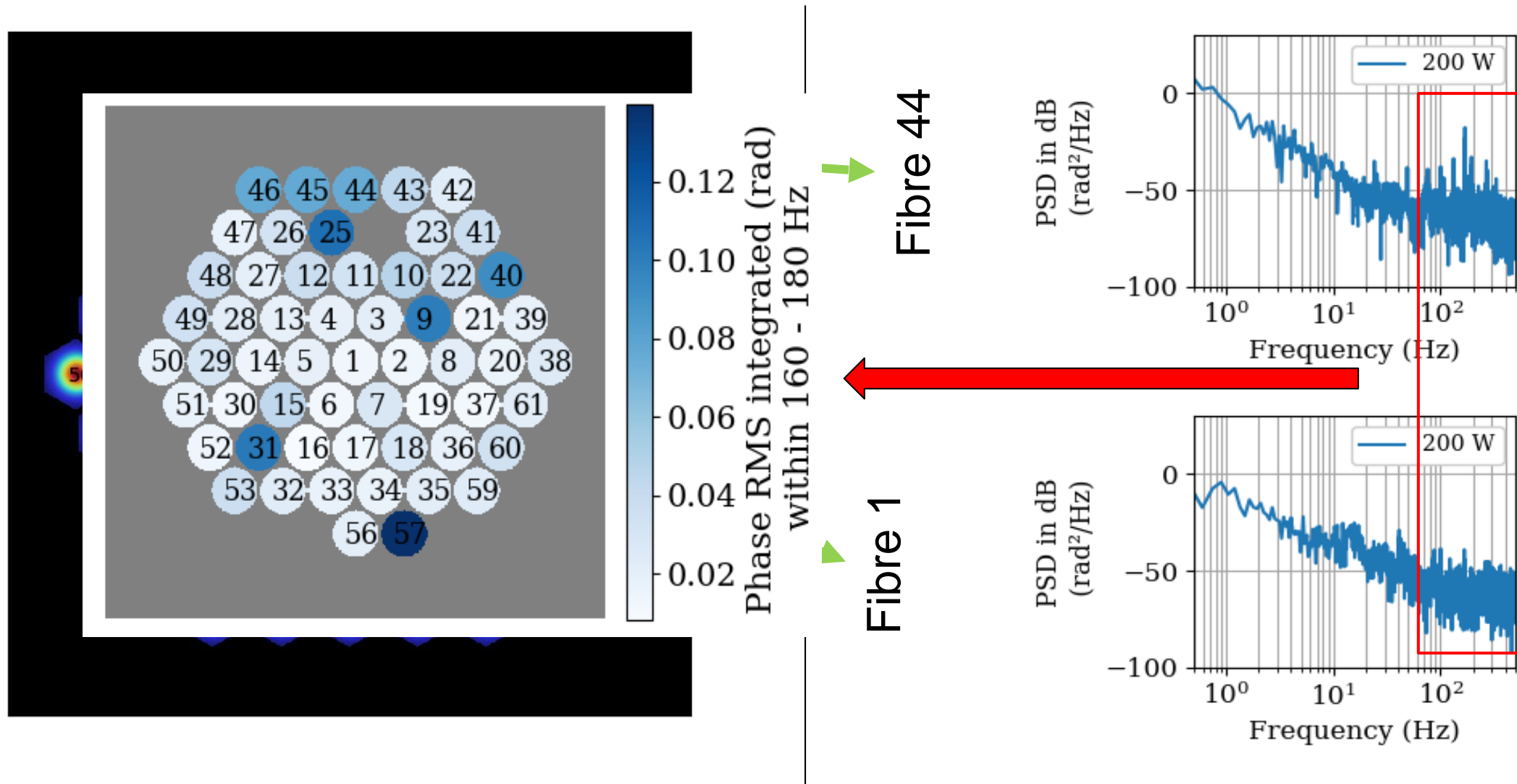


Boucle ouverte: des différences de comportement des phases des fibres

=> Différences sur le matériel *a priori* identique ? (canaux lasers conçus à l'identique)

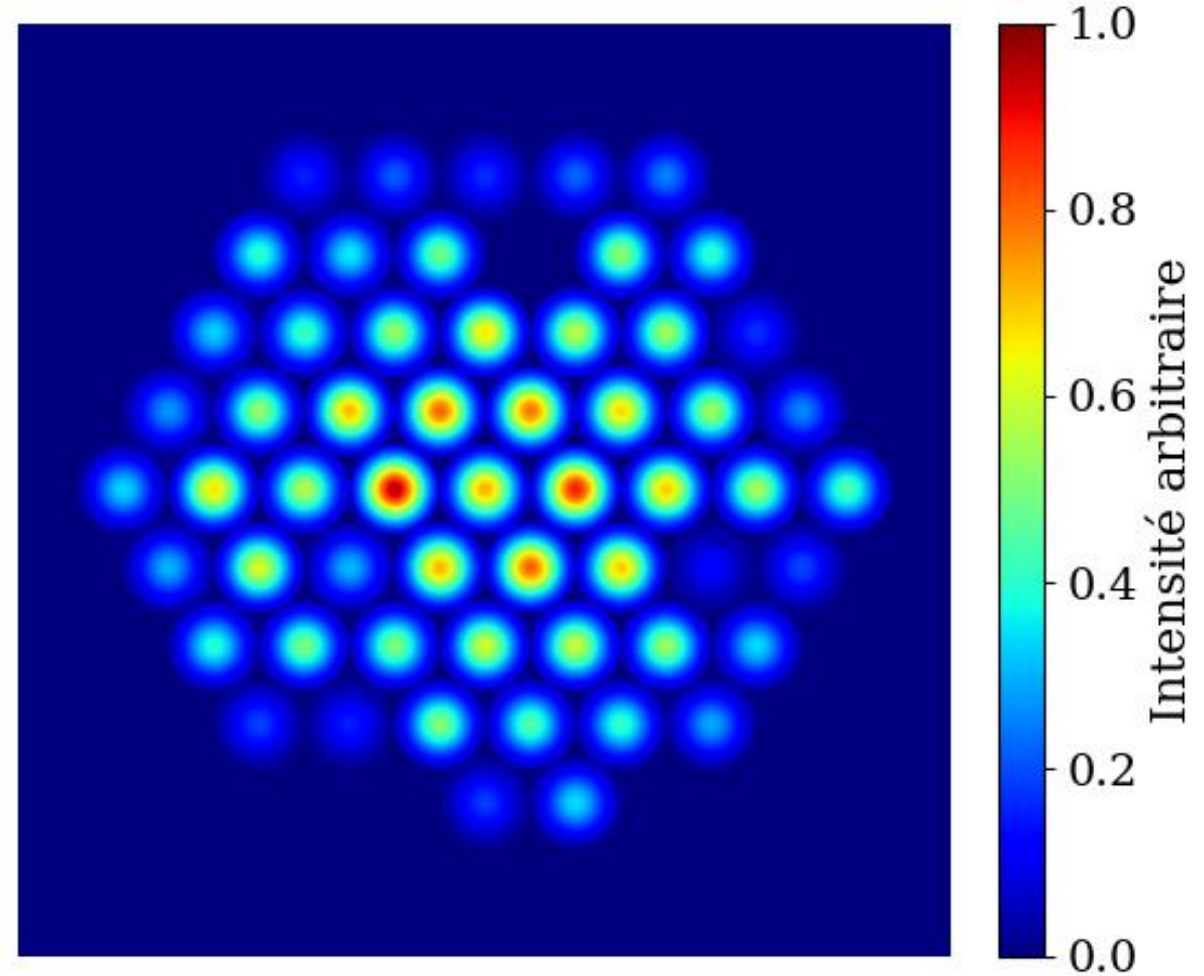
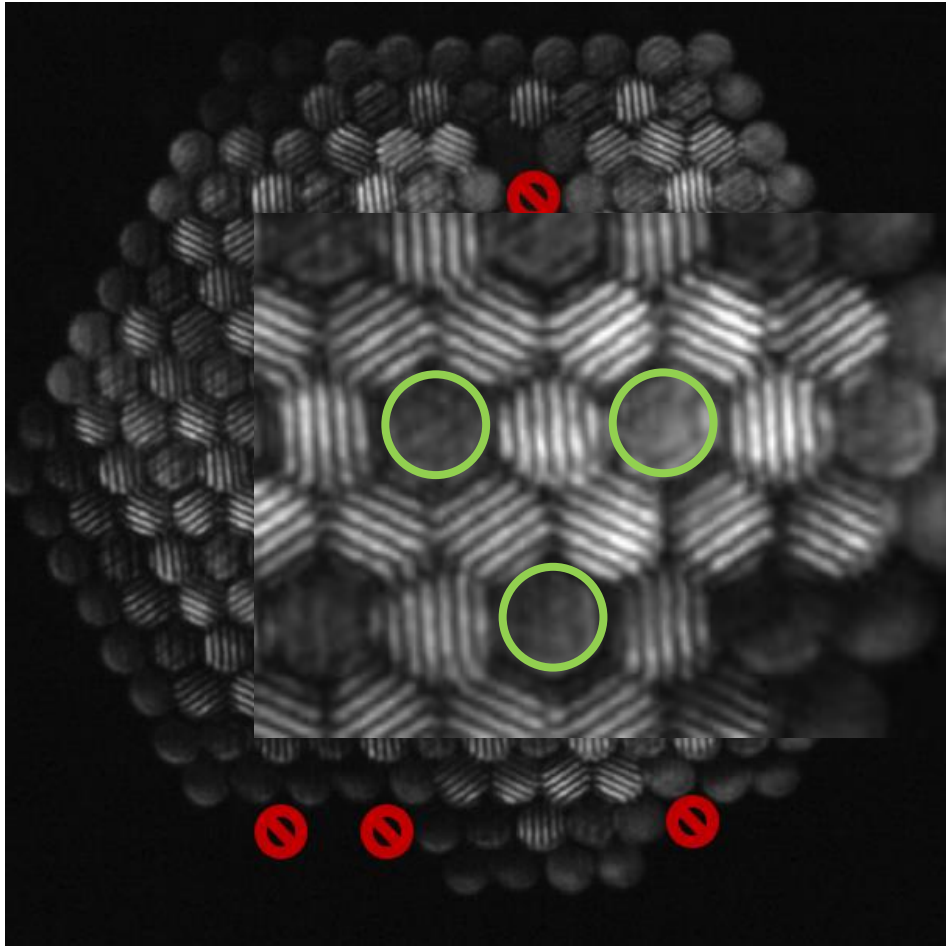


# La caractérisation simultanées de plusieurs amplis

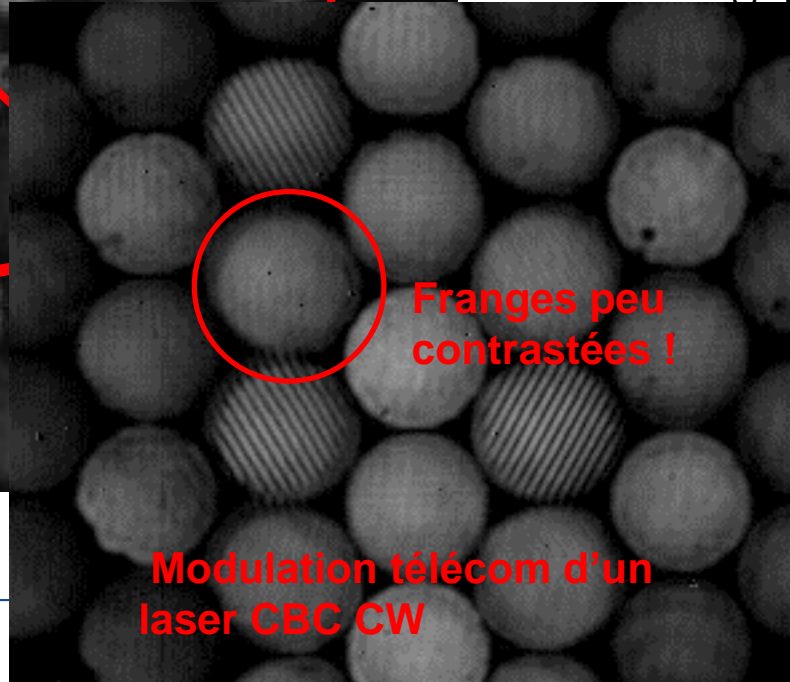
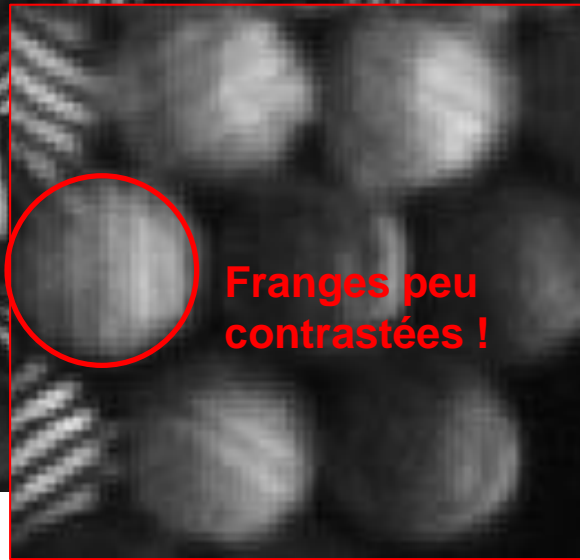
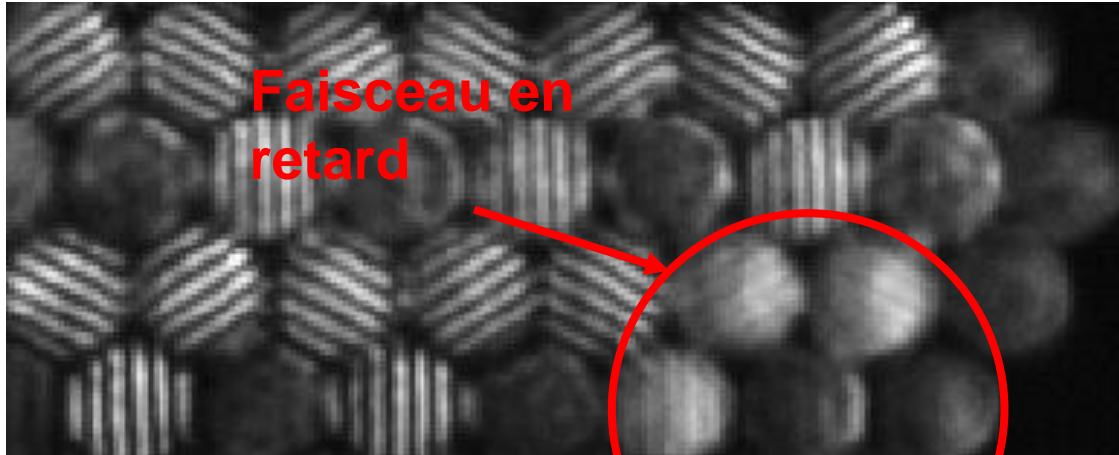




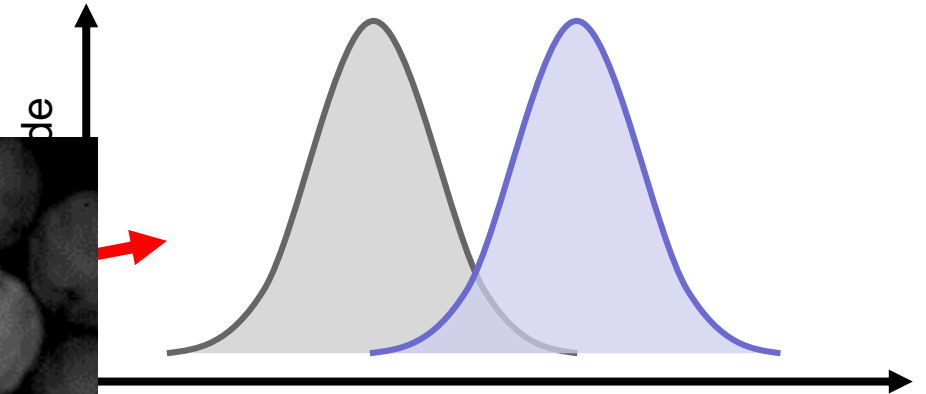
# Vers la mesure des intensités



# Vers la mesure des retards d'impulsions



## Mesurer les retards pour les faisceaux ultracourts



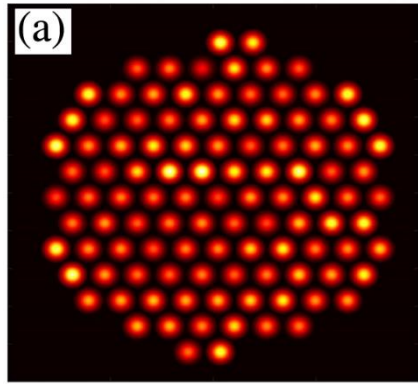
Retard temporel (s)

Perte de cohérence  
À cause du retard

# Conclusion finale

- **CBC de sources laser: mise en phase d'amplis fibrés**
- **Diagnostic XCAN avec IDML PISTIL:**
  - Mesures de N phases en boucle fermée (variations de +/-  $\lambda/50$  mesurées à  $\lambda/150$ )
  - Mesures de N phases en boucle ouverte
  - Effets d'un regroupement d'amplis dans une maille (certains canaux ont des artefacts)
  - D'autres mesures sont accessibles: améliorations en fonction du besoin !

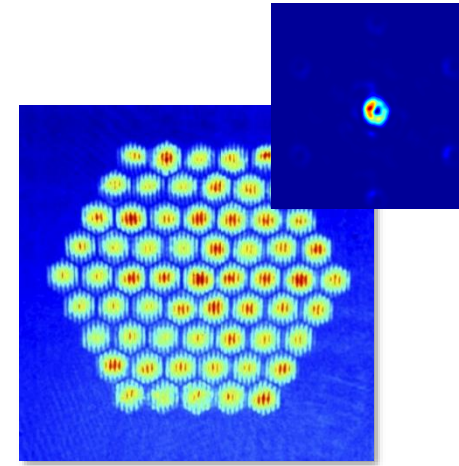
# État de l'art de la CBC



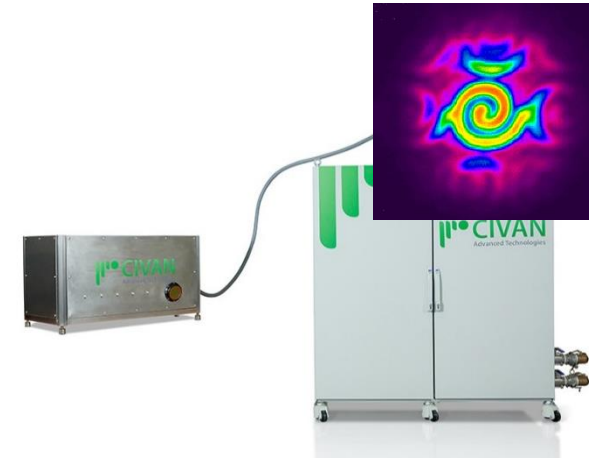
Univ. Changsha, Chine  
(2021)  
+100 faisceaux passifs



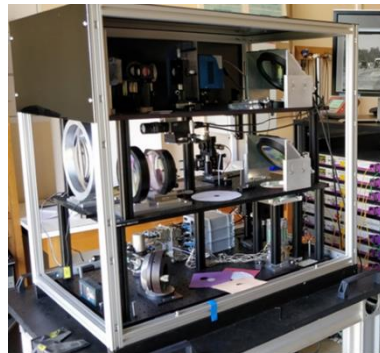
Univ. Dayton, USA  
(2011-2016)  
21 faisceaux CW / 7 km  
de turbulence



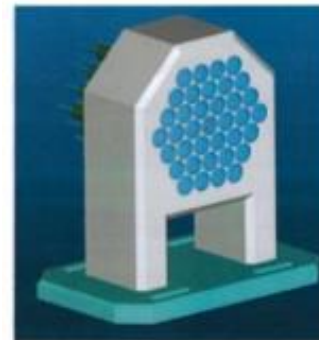
XCAN, France  
(X/Thales) (2020)  
Jusqu'à 61 faisceaux  
amplifiés femto



Civan Lasers, Israël  
(2021)  
Jusqu'à 16 faisceaux  
amplifiés CW  
Première entreprise à  
commercialiser ce type  
de laser



ONERA, France  
(2021 & 2023)  
7 faisceaux amplifiés CW  
à 1 km de turbulence  
**Démonstration télécom**



XLIM, France  
(Limoges / Cilas)  
Boucle de contrôle à  
**masque de phase** en  
champ proche (unique!)



# Session 3: Biologie 1

*Chairman : Serge Monneret*

- *Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie optique. **Pierre Bon**, XLIM*
- *Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI. Principe, métrologie et applications. **Julien Savatier**, Institut Fresnel*
- *L'ID4L comme microscopie thermique. **Guillaume Baffou**, Institut Fresnel*

# Session 3: Biologie 1

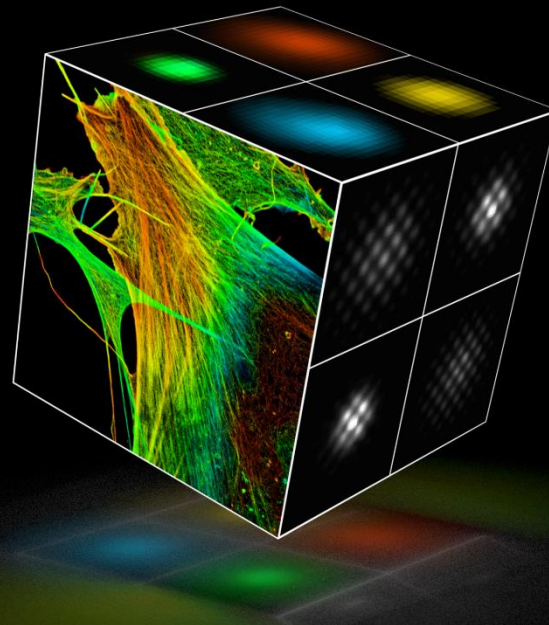
*Chairman : Serge Monneret*

- *Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie optique. **Pierre Bon**, XLIM*
- *Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI. Principe, métrologie et applications. **Julien Savatier**, Institut Fresnel*
- *L'ID4L comme microscopie thermique. **Guillaume Baffou**, Institut Fresnel*



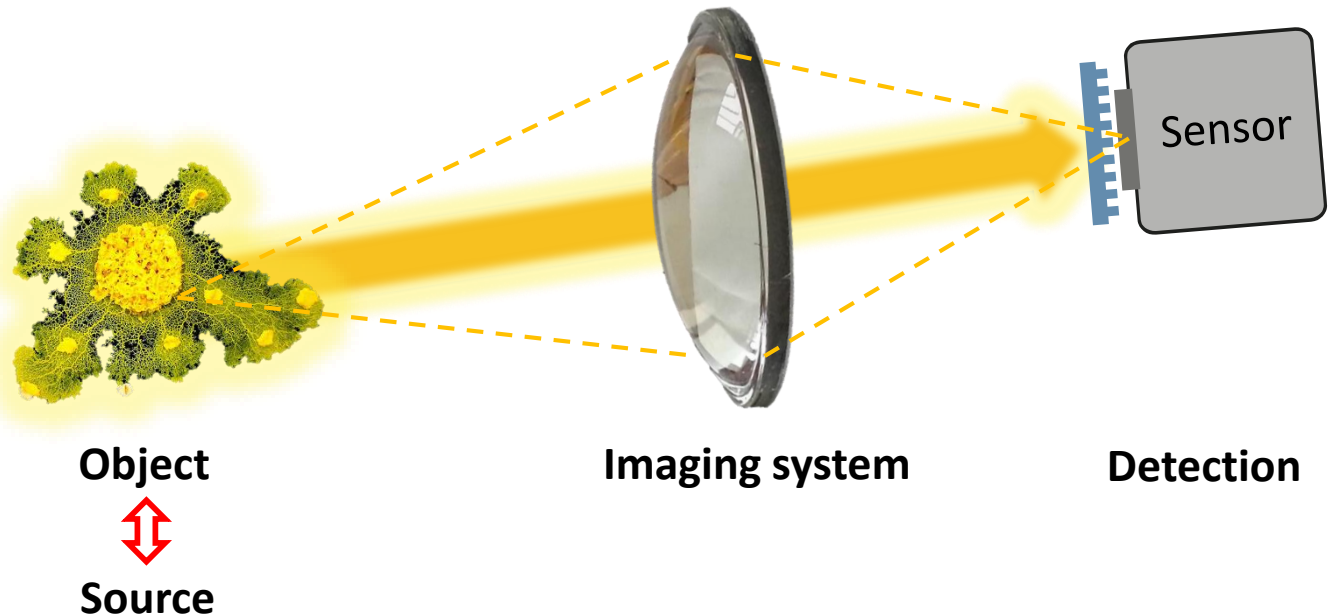
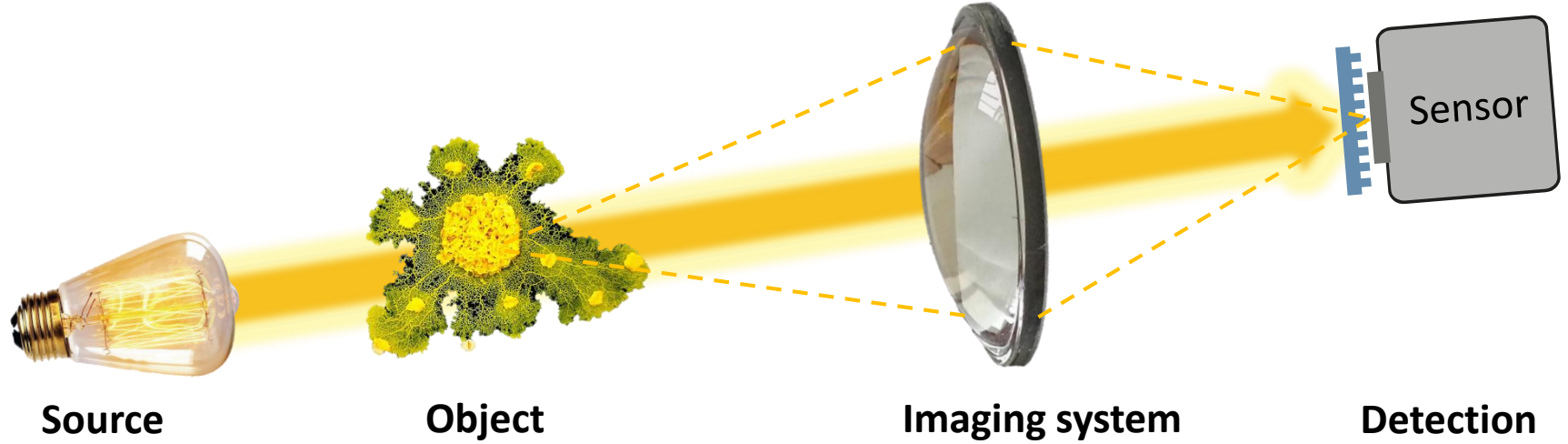
# Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie

Rencontre IDML 2023



Pierre Bon

# (Quantitative phase) Imaging...

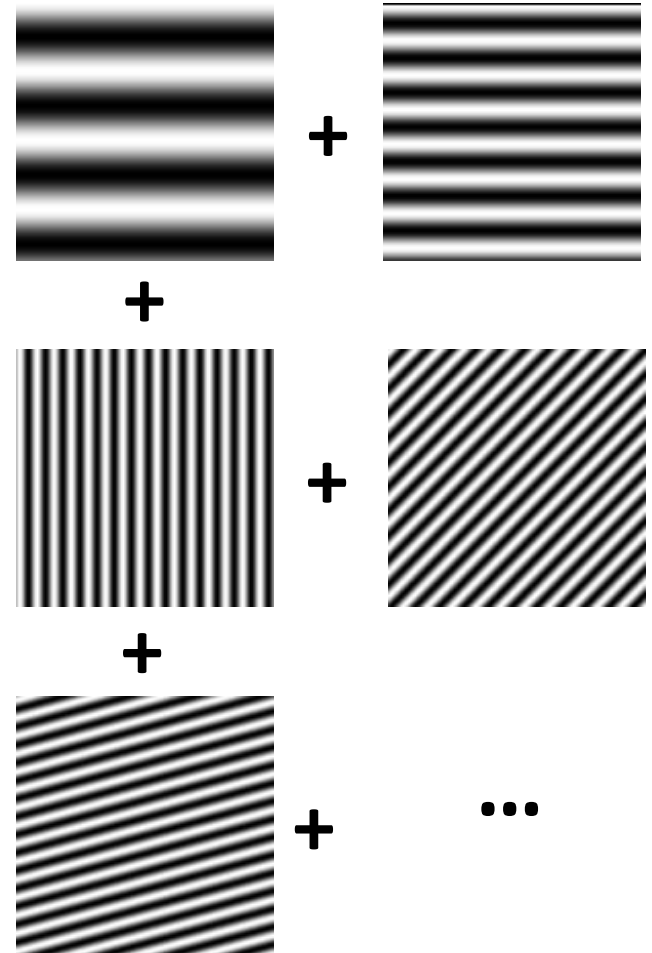
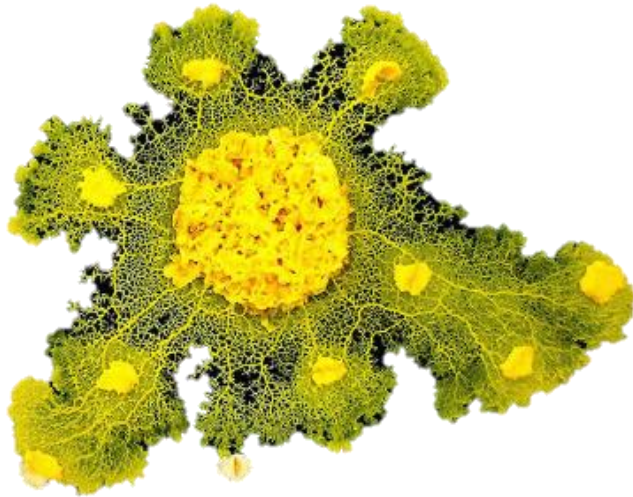


Each part is crucial for image formation and analysis



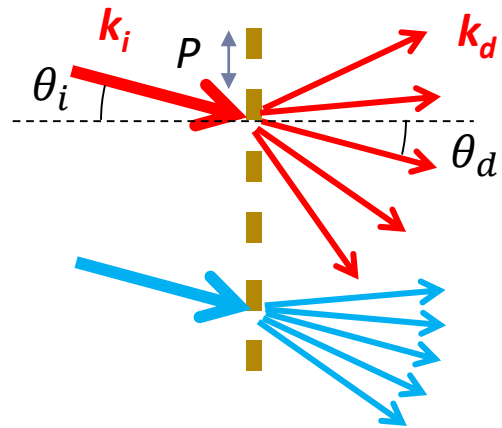
# Everything is a grating: Fourier series decomposition

Object

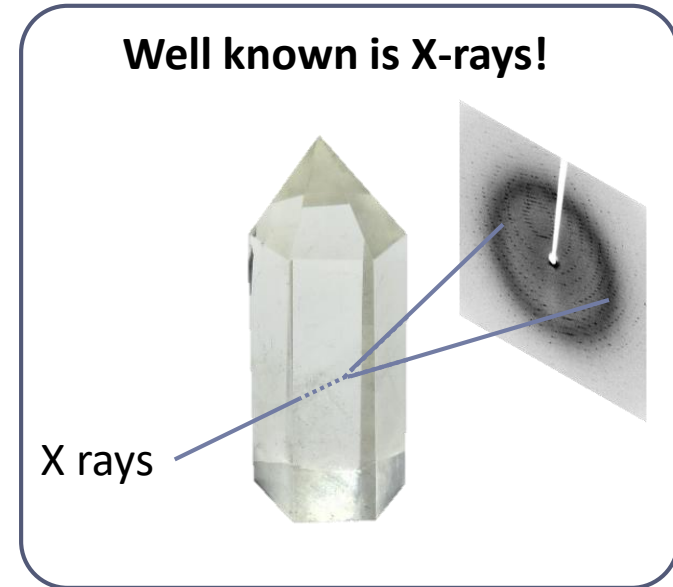
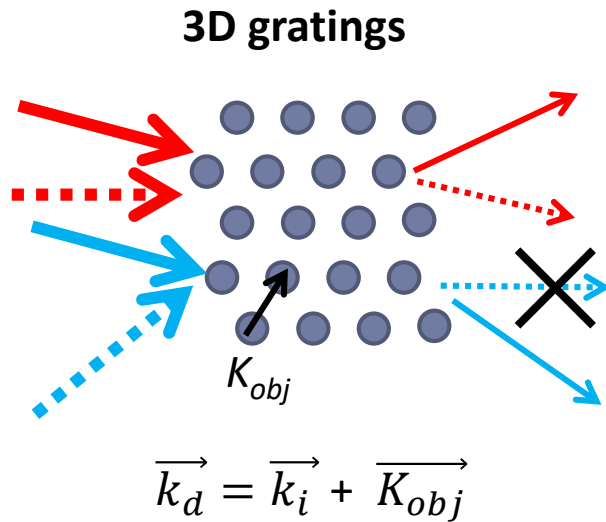


Understanding imaging ⇔  
light/grating interaction

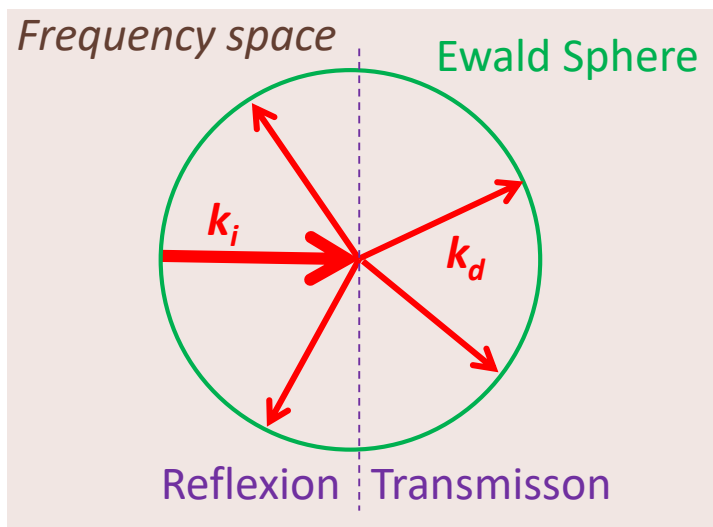
## Thin 2D gratings

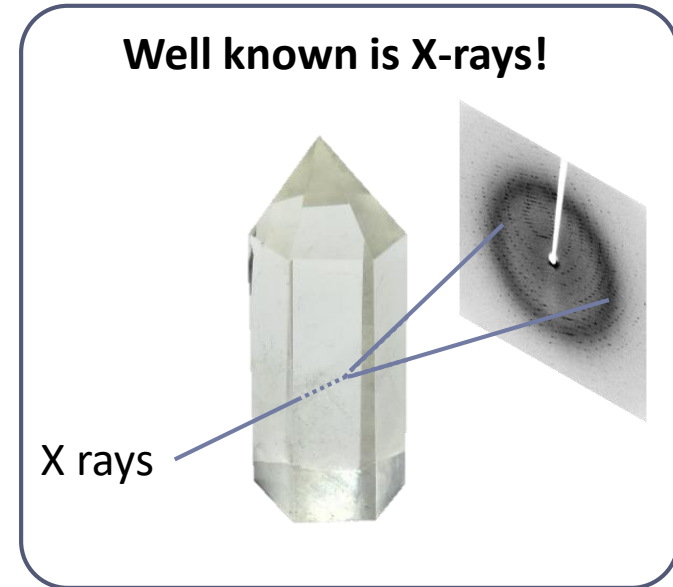
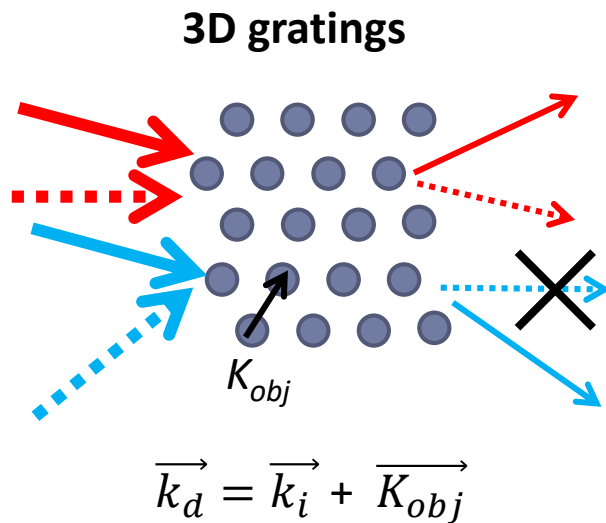


$$\sin \theta_d - \sin \theta_i = N \frac{\lambda}{P}, N \in \mathbb{Z}$$

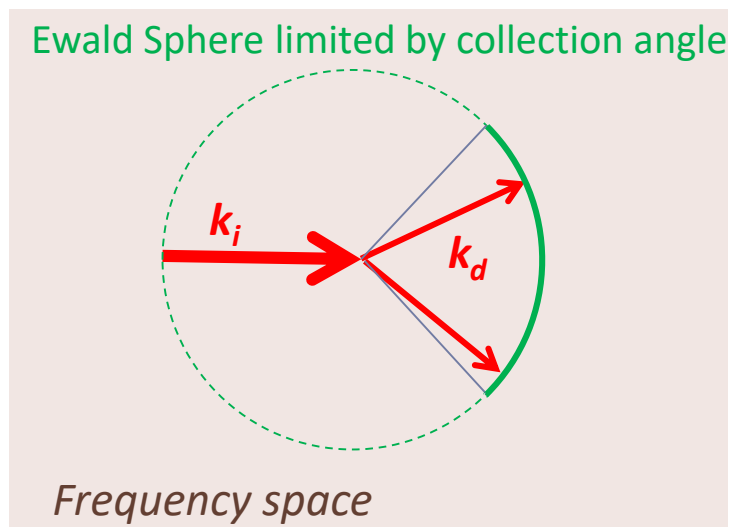


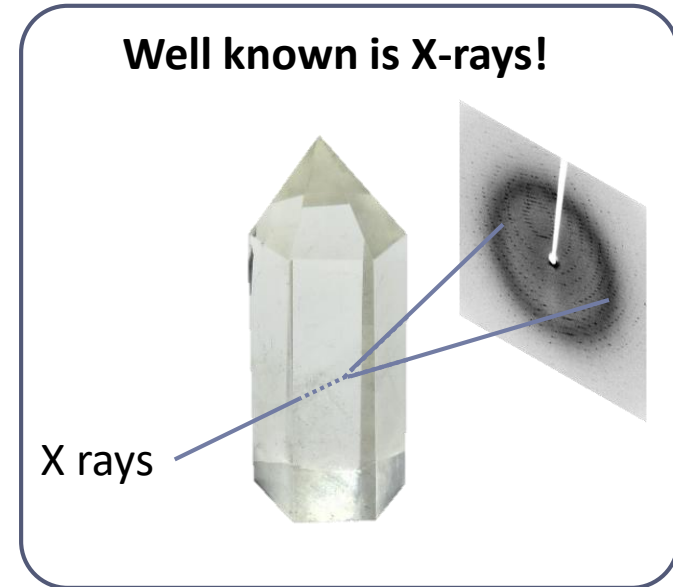
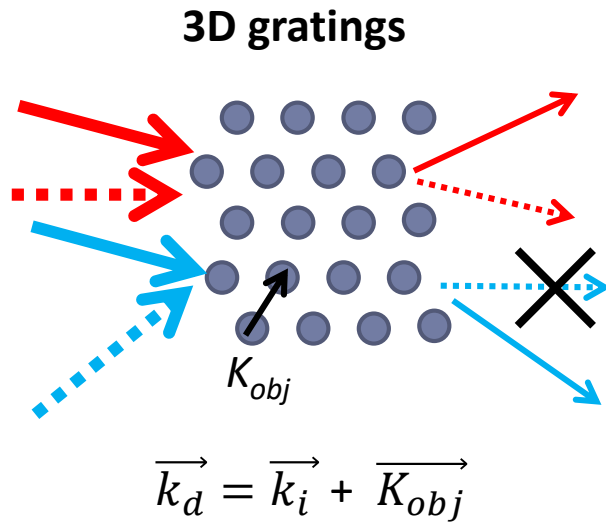
**Accessible diffracted beams are carried by the Ewald sphere**



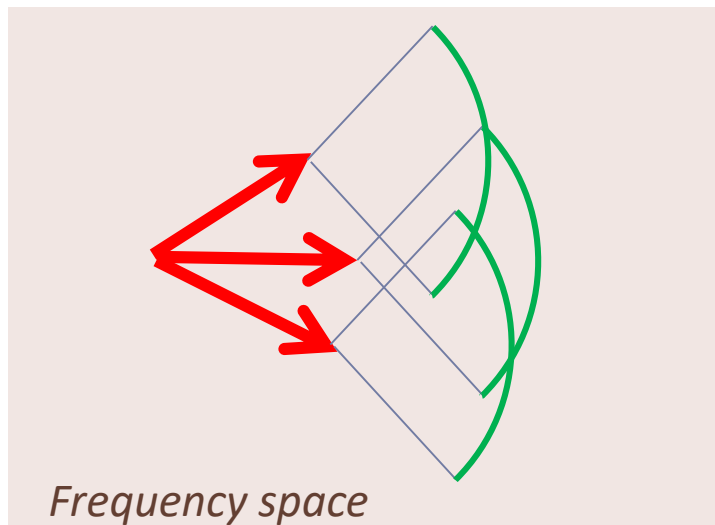


**Accessible diffracted beams are carried by the Ewald sphere**

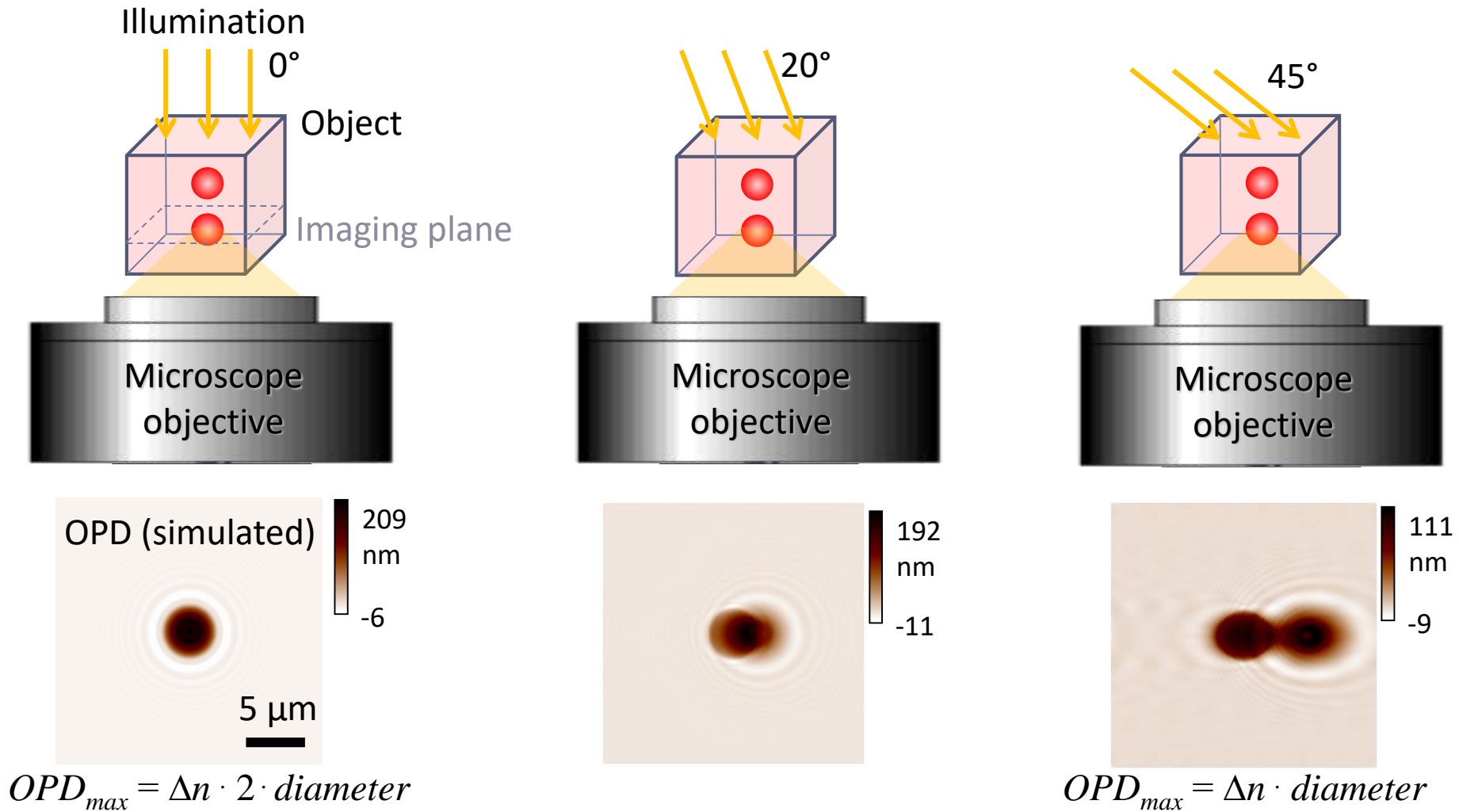




**Accessible diffracted beams are carried by the Ewald sphere**

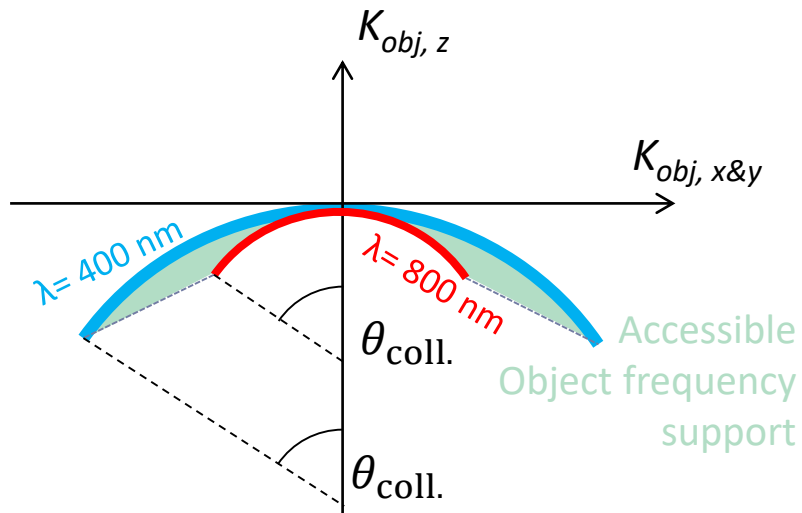


# (Visual) effect of an illumination angle



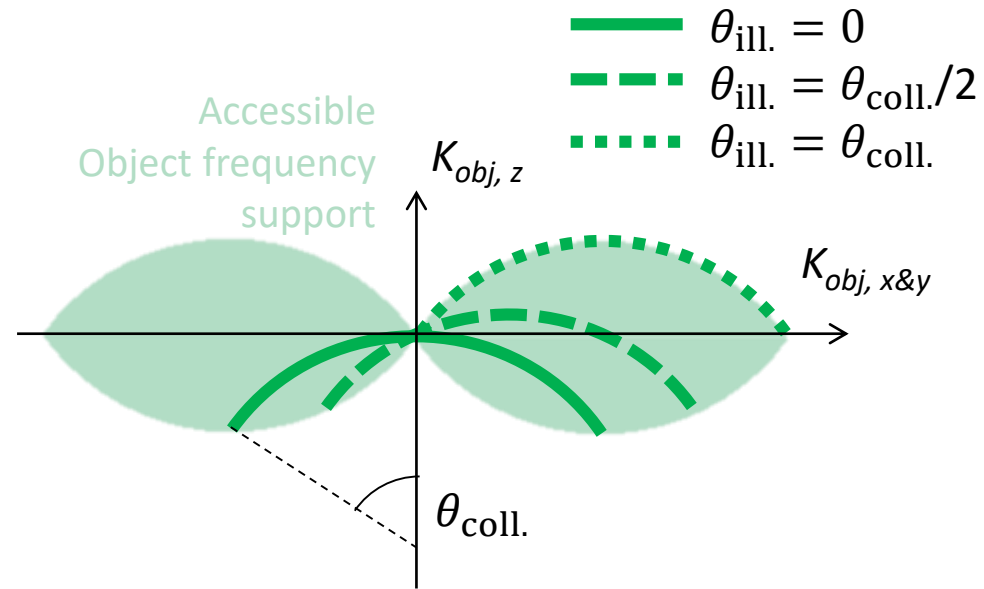
Used in diffraction tomography methods<sup>1,2</sup>

## Diversity of wavelength

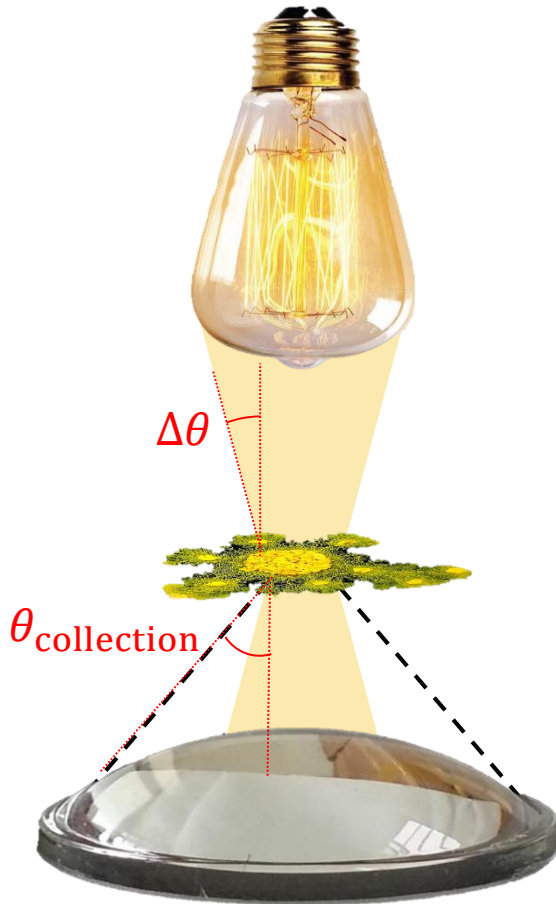


Mainly interesting to remove coherent noise (speckle)

## Diversity of angles



Completely change the information from the sample



« **Temporal coherence** »  $\Leftrightarrow$  wavelength diversity on samples

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{central}}} \quad \text{if } \rightarrow 0 = \text{highly coherent}$$

« **Spatial coherence** »  $\Leftrightarrow$  angle diversity on samples

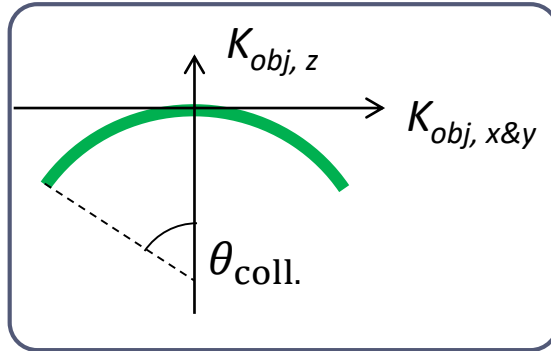
$$\frac{\sin \Delta\theta}{\sin \theta_{\text{collection}}} = \frac{NA_{\text{illum.}}}{NA_{\text{collection}}} \quad \text{if } \rightarrow 0 = \text{highly coherent}$$

**Imaging is equivalent to collect emitted or diffracted light**

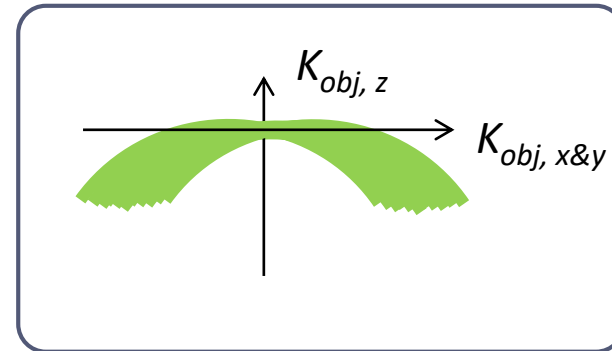


# 3 different imaging regime, playing with coherence

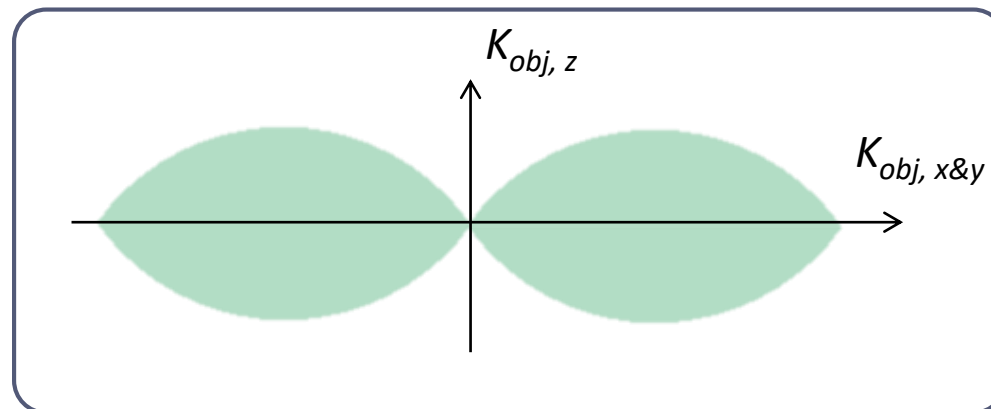
## High spatio-temporal coherence

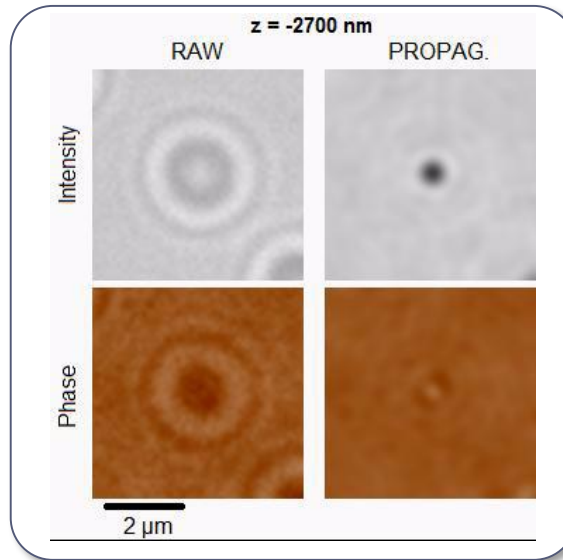
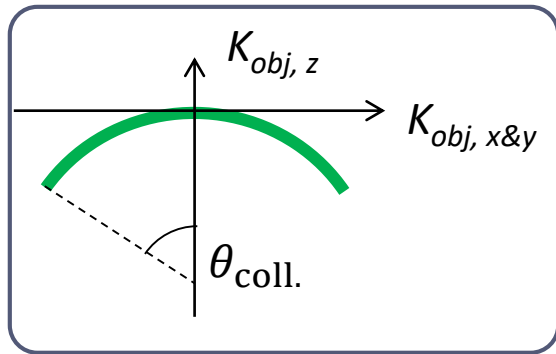


## Medium spatio-temporal coherence



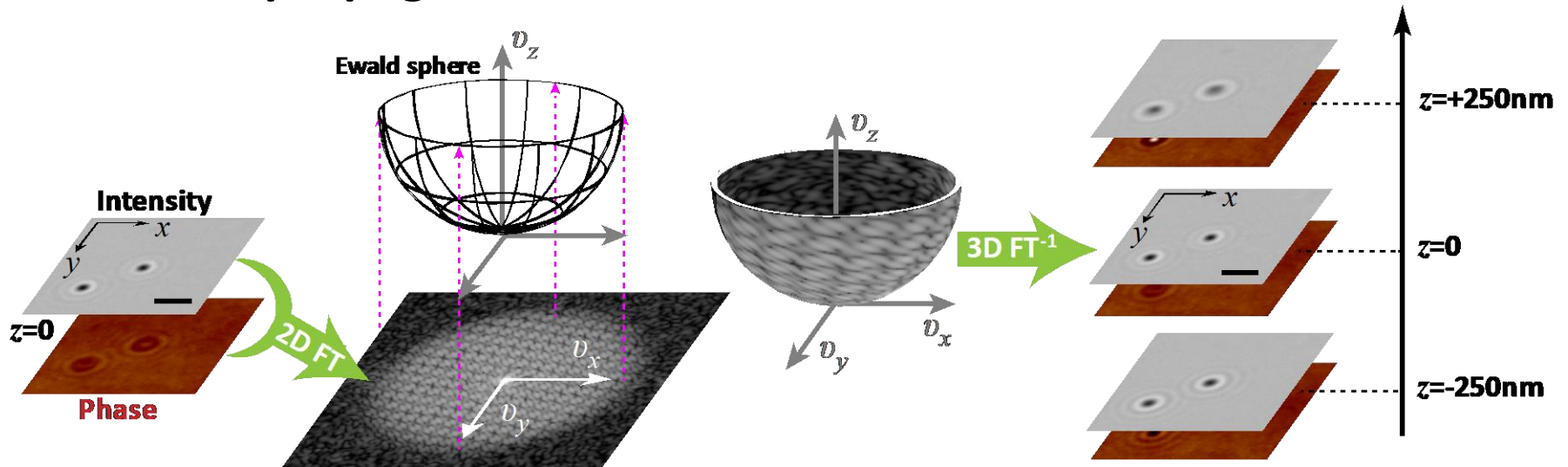
## Low spatio-temporal coherence



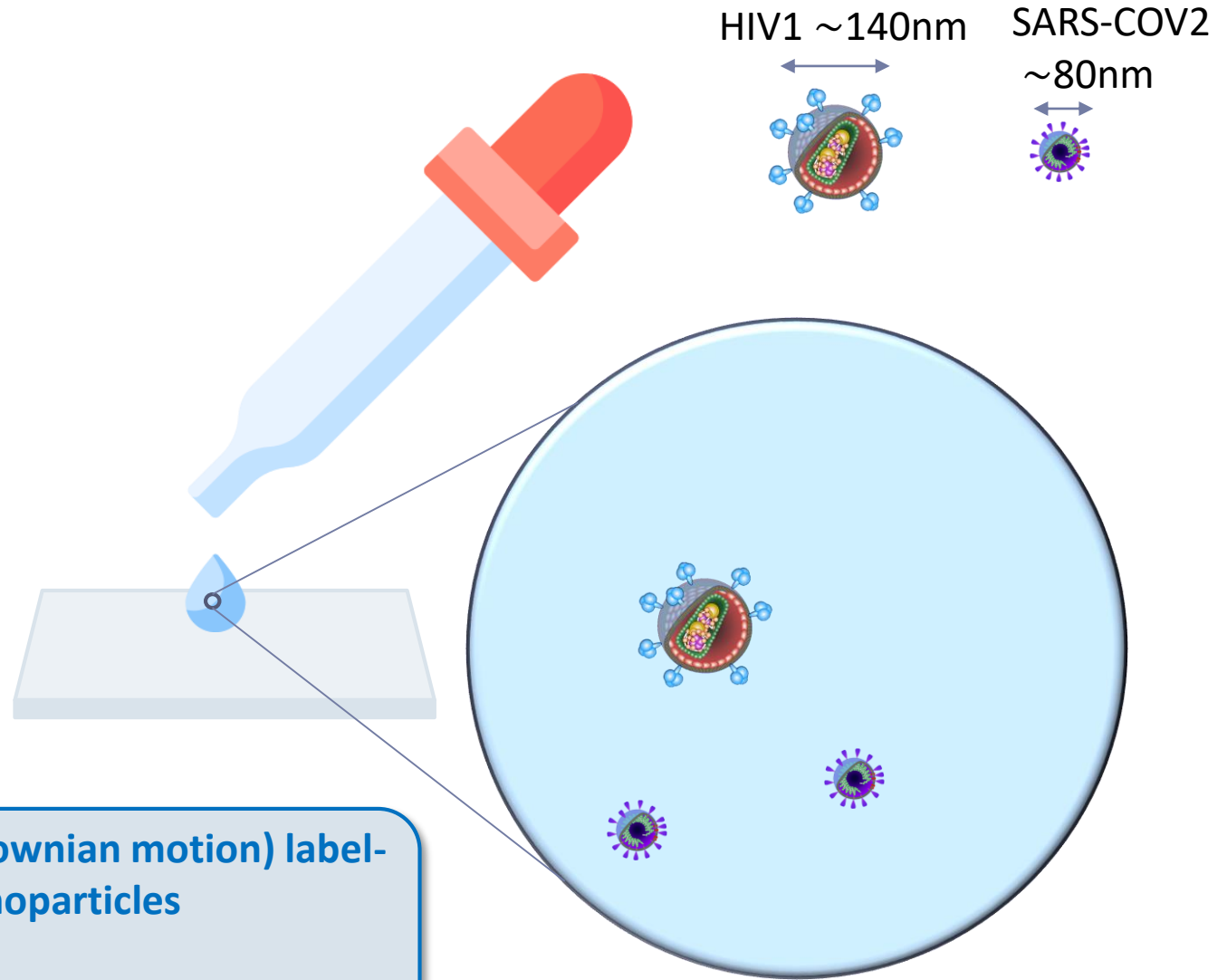


Ultra-large depth-of-field of view

## Numerical propagation



# One application: label-free virus and nanoparticle characterization



Freely diffusing (Brownian motion) label-free nanoparticles

Speed  $\Leftrightarrow$  Size

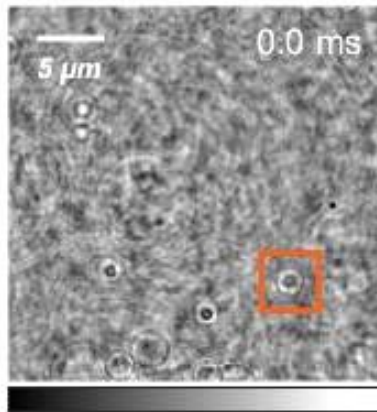
# Label-free virus and nanoparticle characterization



M.C. Nguyen

Ultrafast acquisition (400Hz)

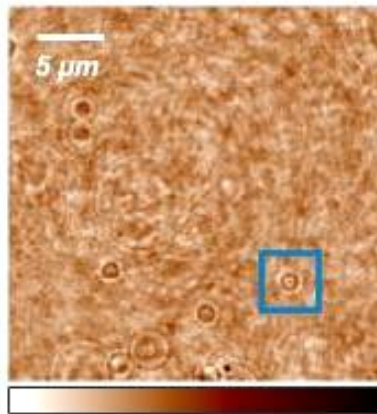
INT



0.95 Intensity (a.u.) 1.05

Numerical propagation

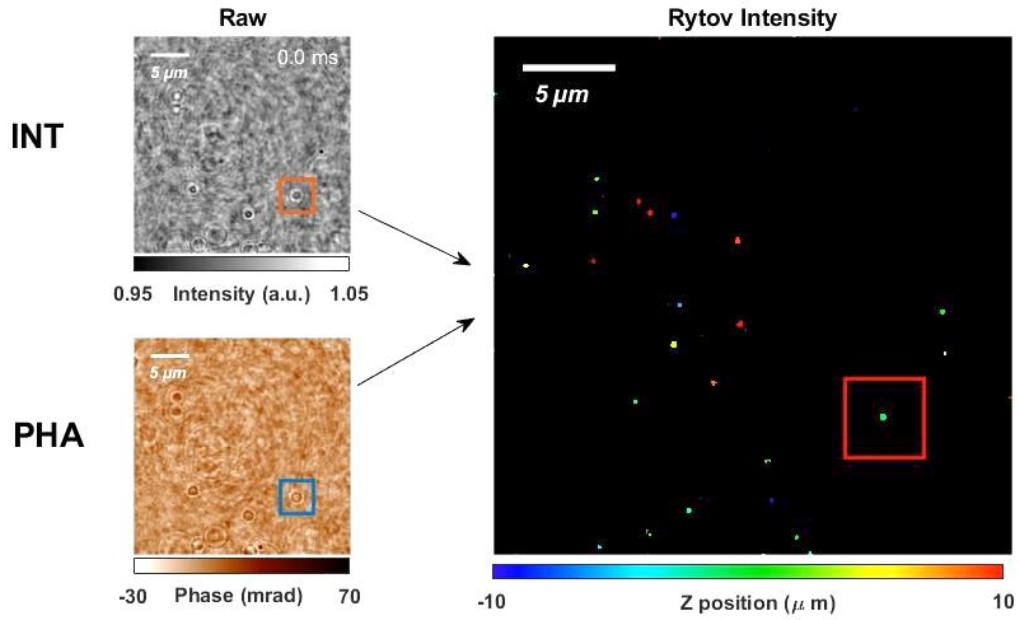
PHA



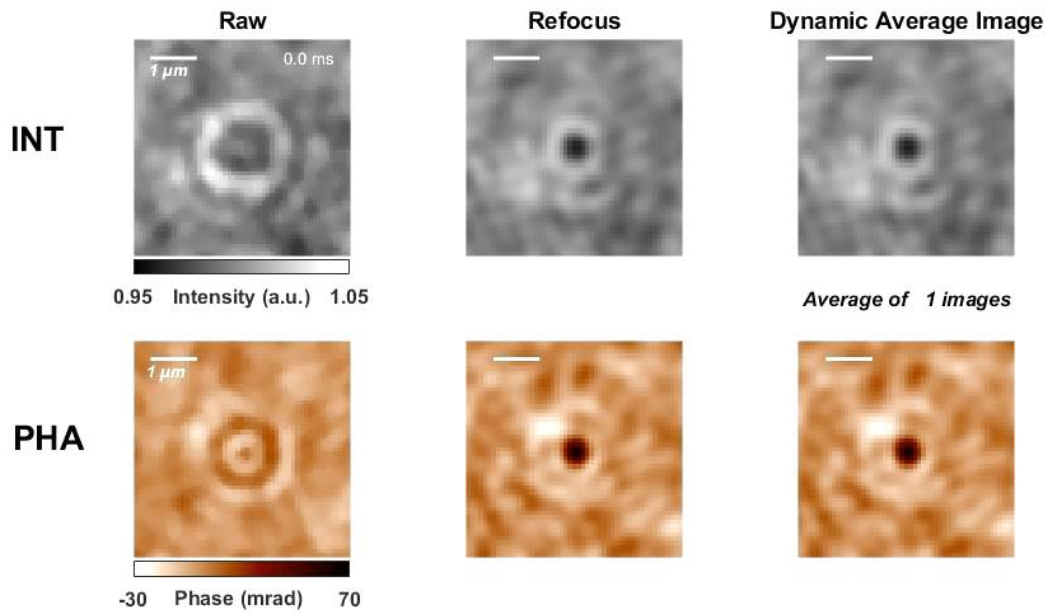
-30 Phase (mrad) 70

Unbiased Size & Concentration determination

# Label-free virus and nanoparticle characterization



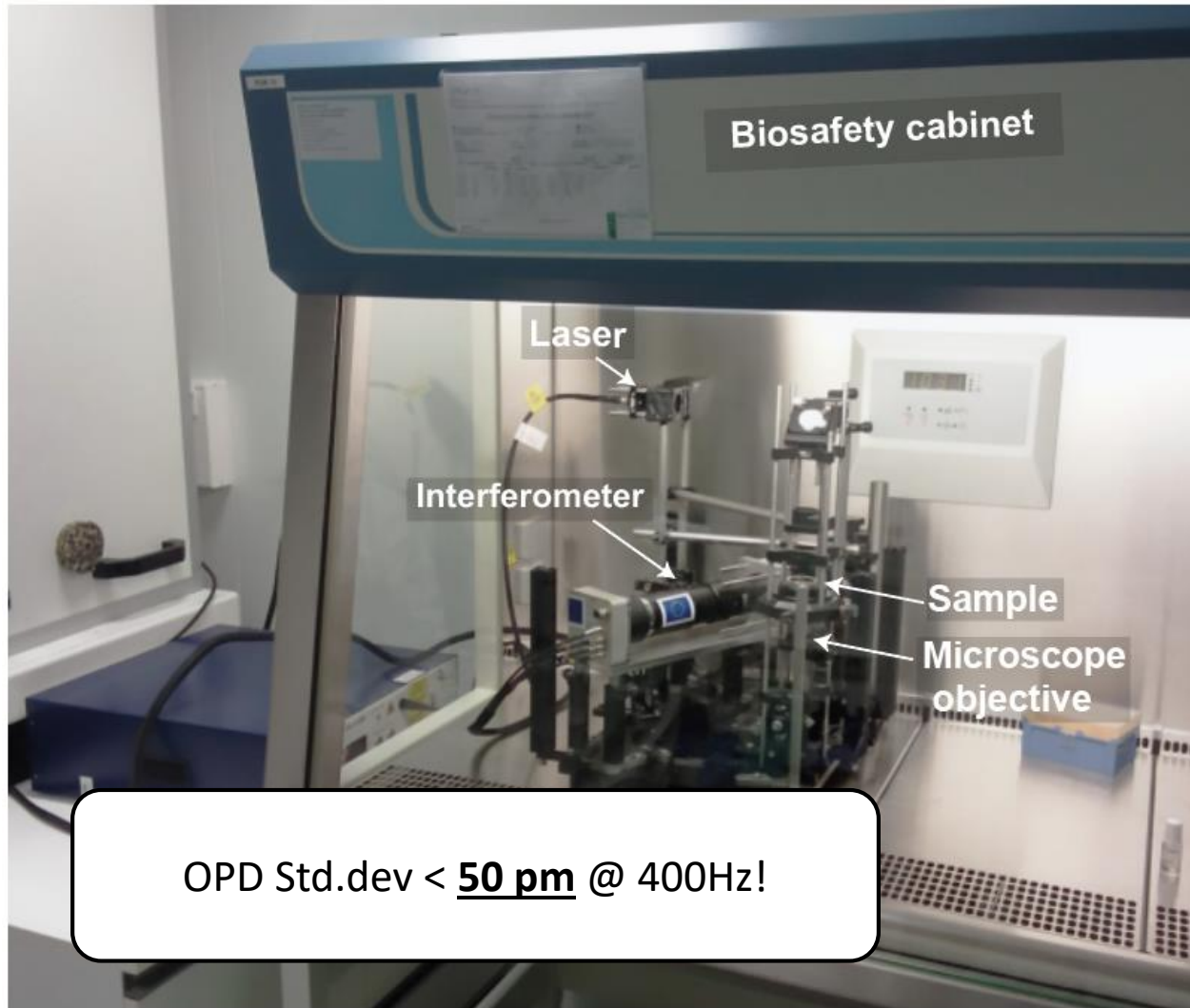
M.C. Nguyen



Highly sensitive optical characterization (refractive index, mass...)

# Imaging of infectious virus inside a L3

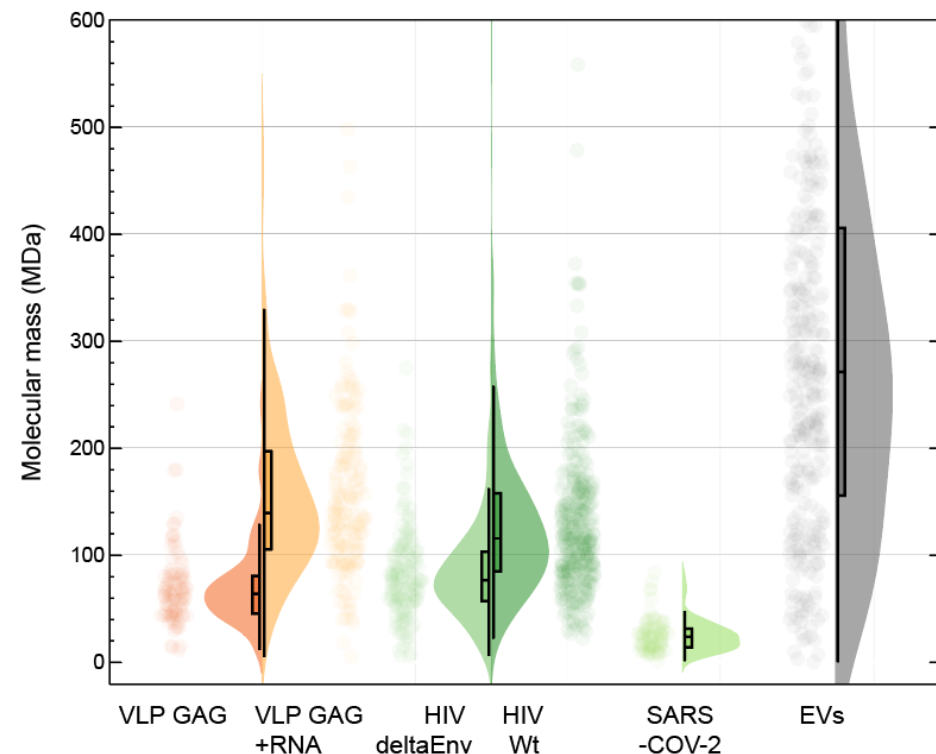
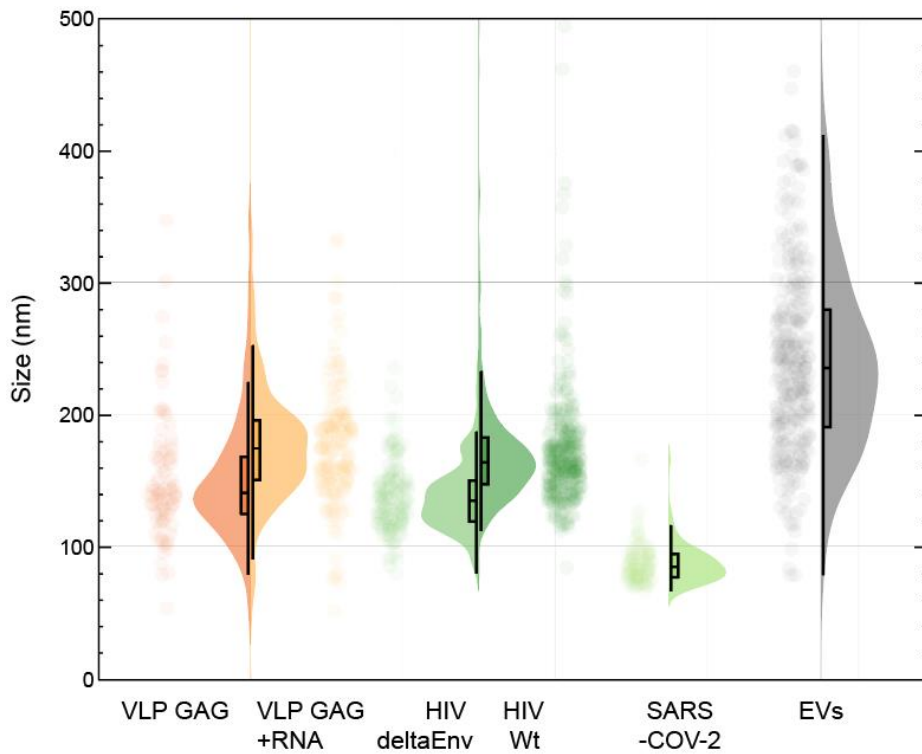
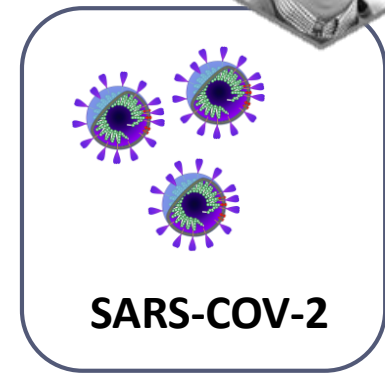
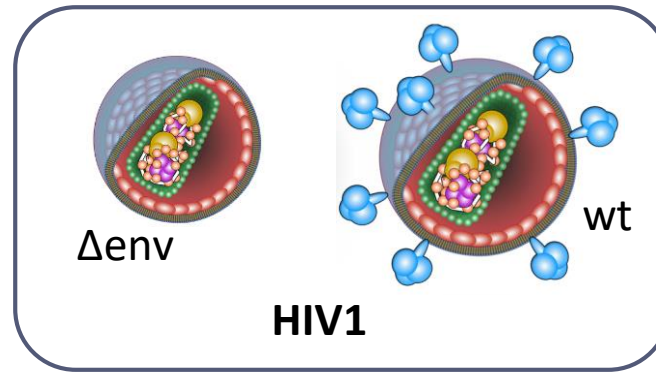
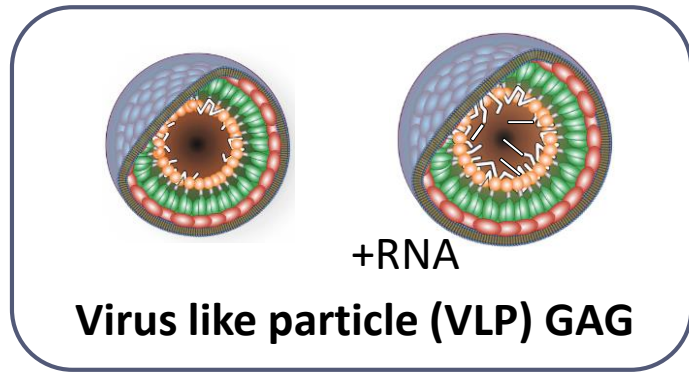
M.C. Nguyen



*Collaboration with D. Muriaux & S. Lyonnais, CEMPAI, Montpellier, France*

# Imaging of infectious virus inside a L3

M.C. Nguyen



Collaboration with D. Muriaux & S. Lyonnais, CEMPAI, Montpellier, France

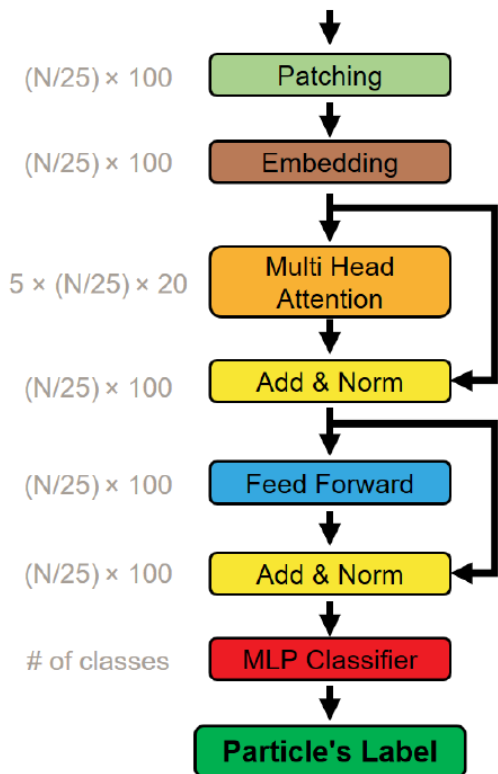
# Machine learning particle classification results



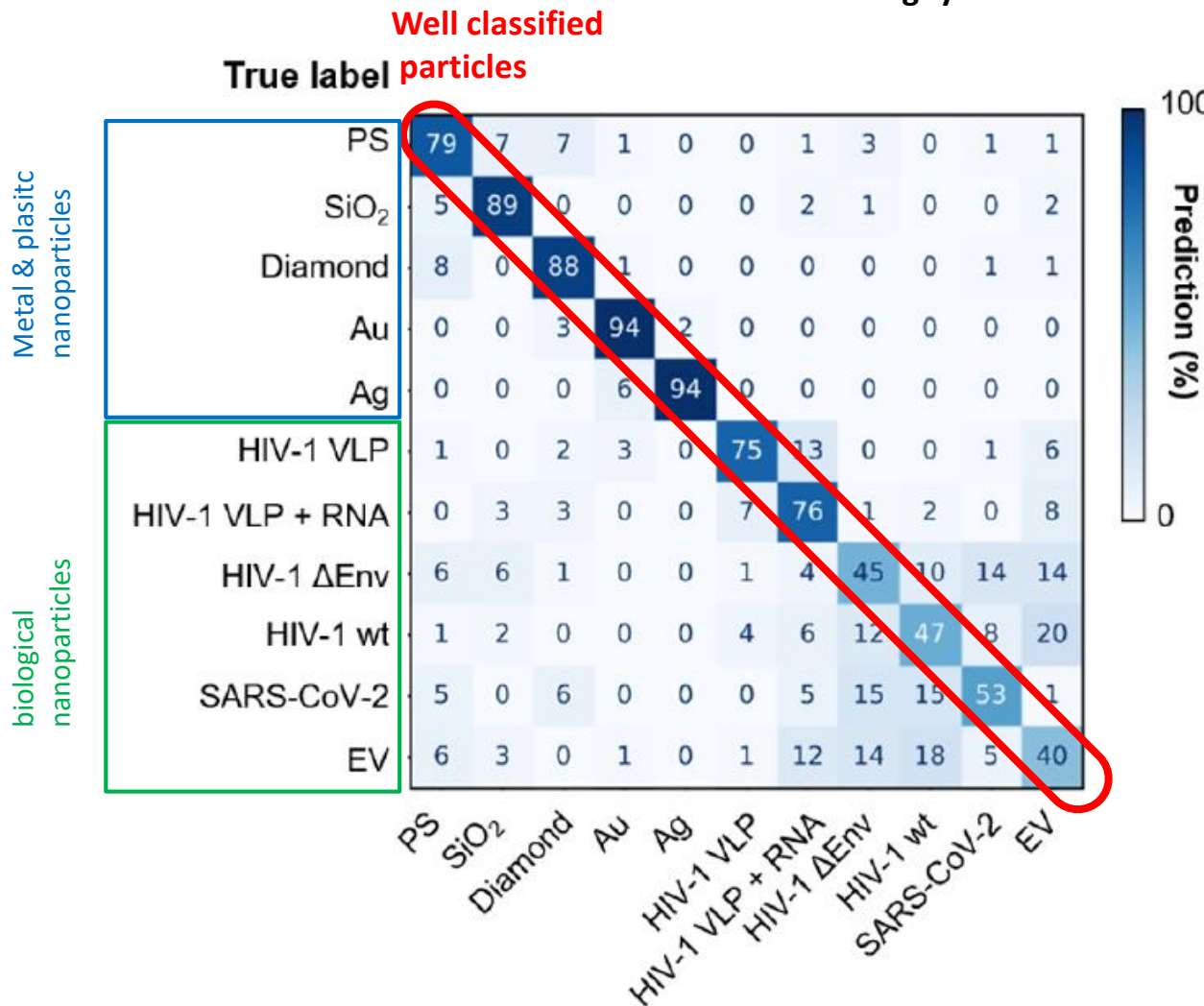
M.C. Nguyen P. Bonnaud

$$\frac{1}{2} \ln \left( \text{Intensity@focus}_{\text{DAI}} + i \text{Phase@focus}_{\text{DAI}} \right)$$

$$d^3$$



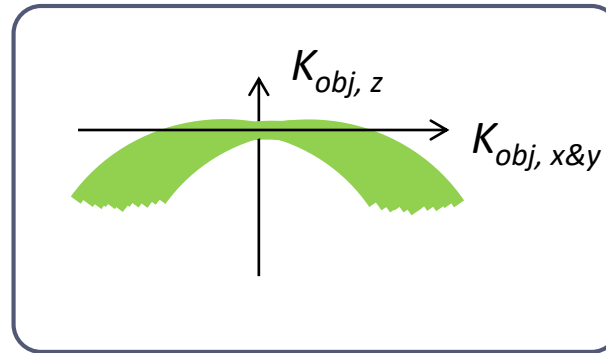
N : Number of image pixels



≈ 80% of accurately classified particles



## Medium spatio-temporal coherence



**Cf other « bio-microscopy » presentations**

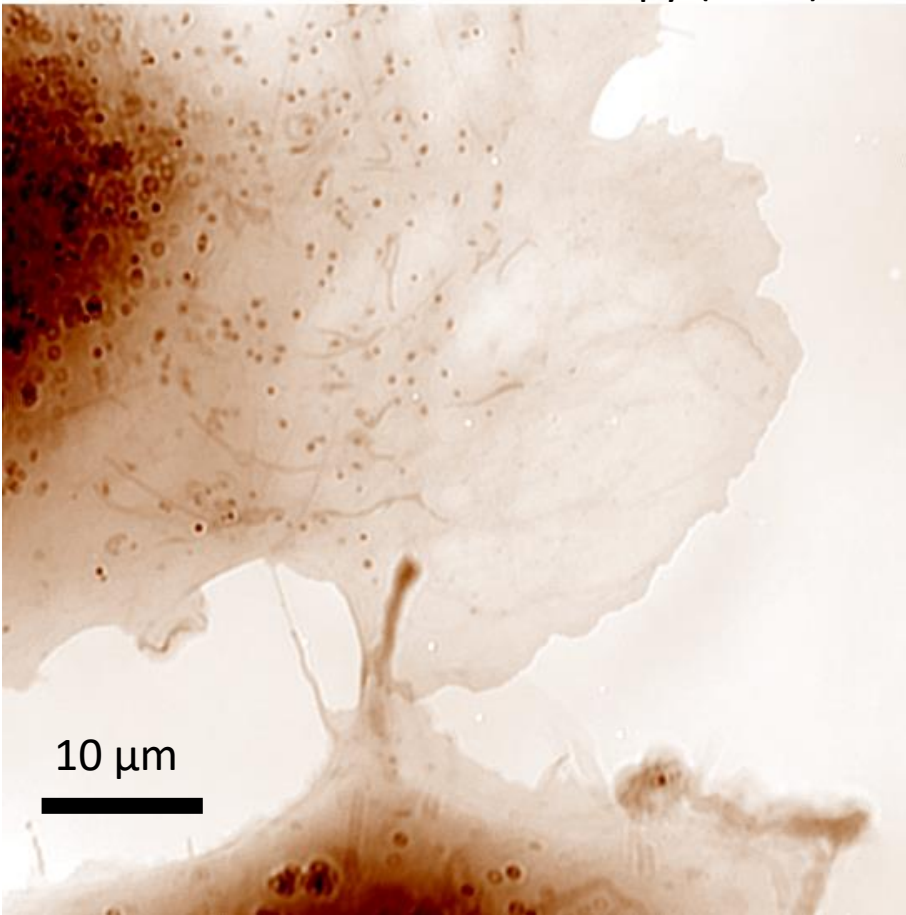
# One striking result @ Sub-cellular scale: organelle imaging

20

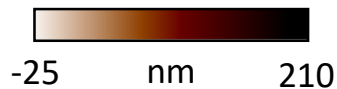
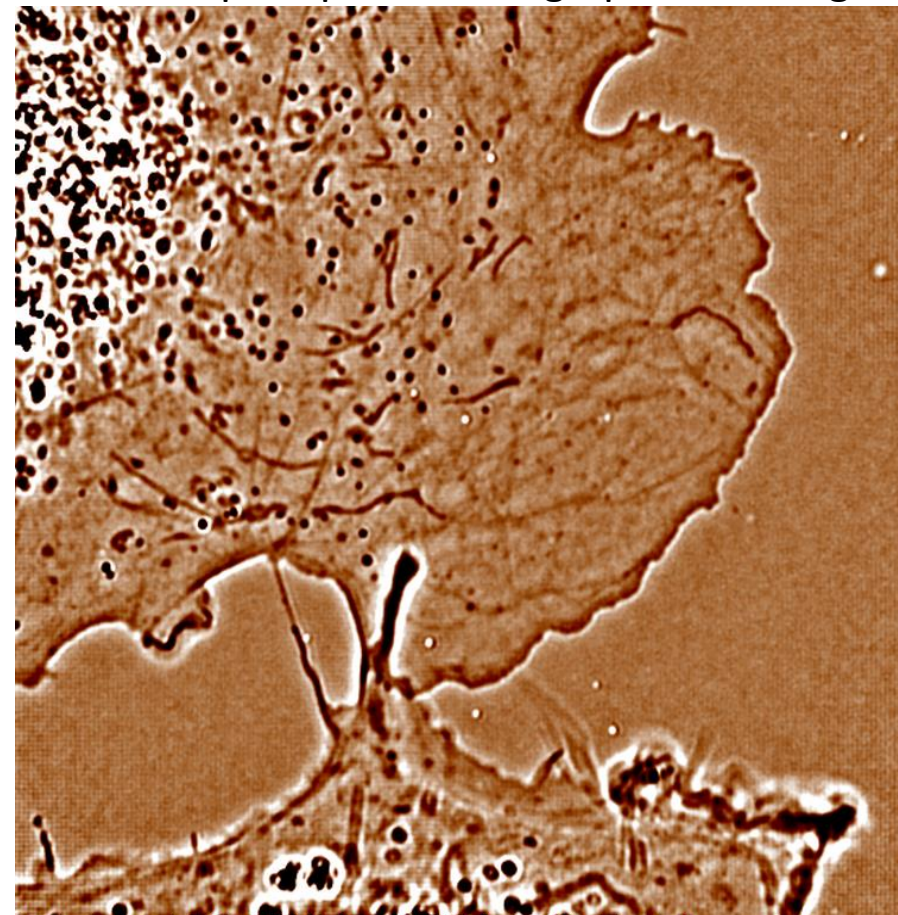
- ▶ Living CHO cells (60x NA=1.49)

Bon *et al.*, Biophys. J. 2014

Quantitative Phase Microscopy (QPM)



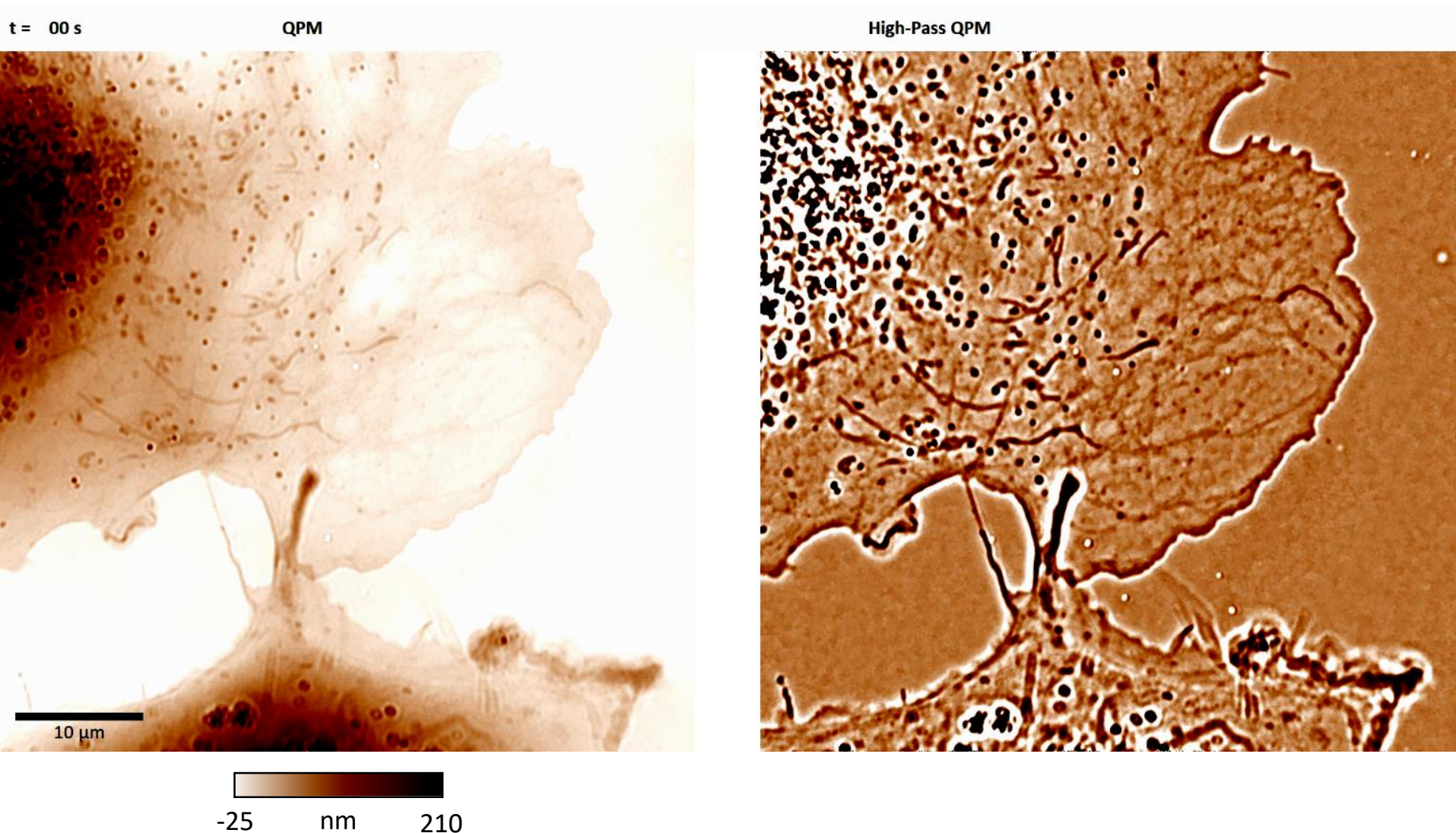
QPM + post-process : High pass filtering



# One striking result @ Sub-cellular scale: organelle imaging

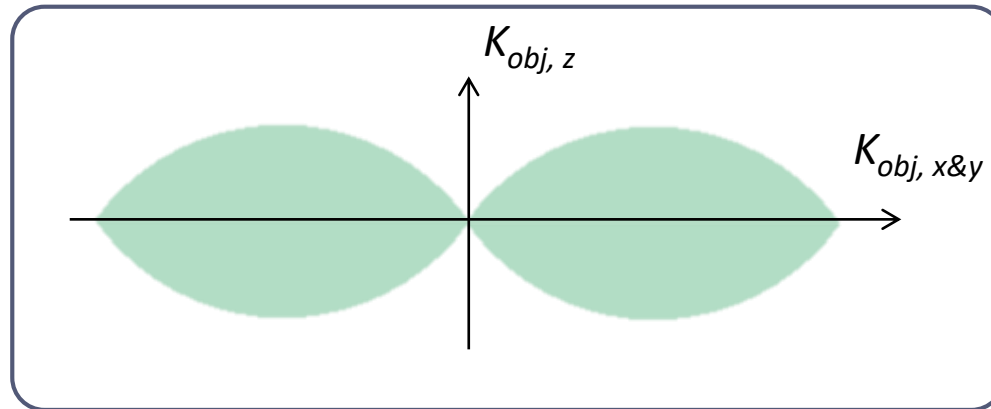
- ▶ Living CHO cells (60x NA=1.49)

Bon *et al.*, Biophys. J. 2014

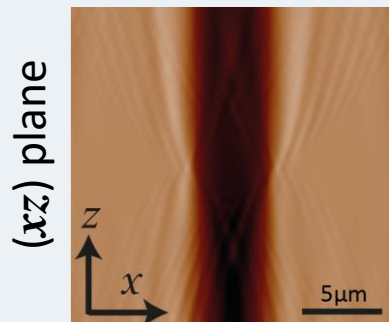
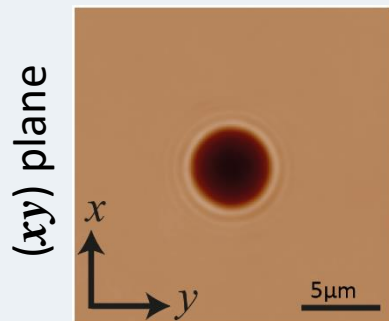
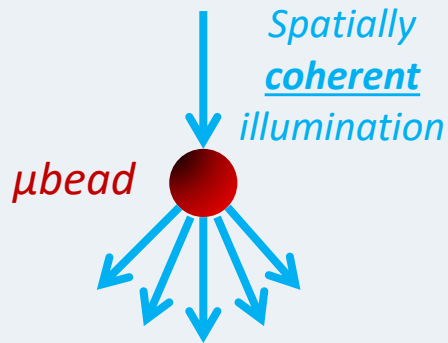


We see potentially all the structures... ..But what do we see 😞 → Presentation of G. Maucort

## Low spatio-temporal coherence



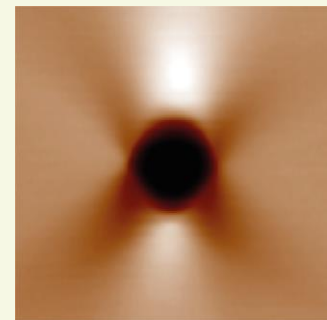
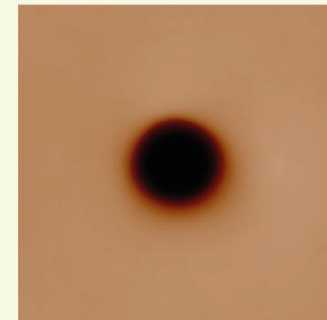
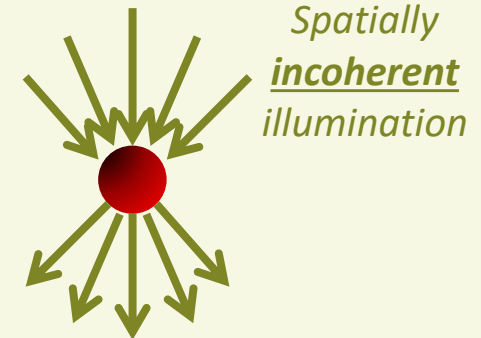
## Spatially coherent



☹ Limited axial resolution

## Spatially incoherent

Bon *et al.*,  
Optics Express  
2014



☺ 3D resolution

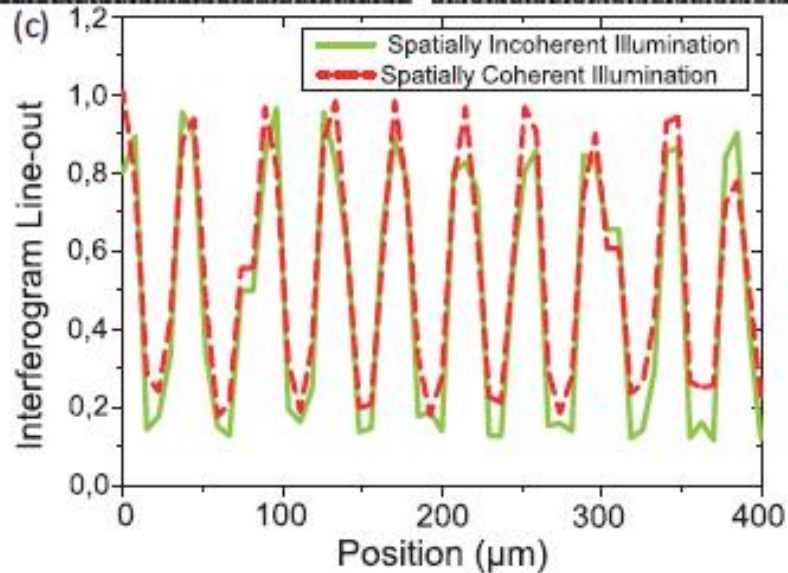
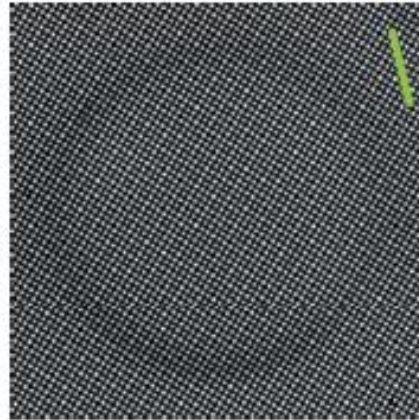
# Capabilities and limits of incoherent QPI

**Interferograms are contrasted  
(thanks to the magnification)**

Coherent illumination

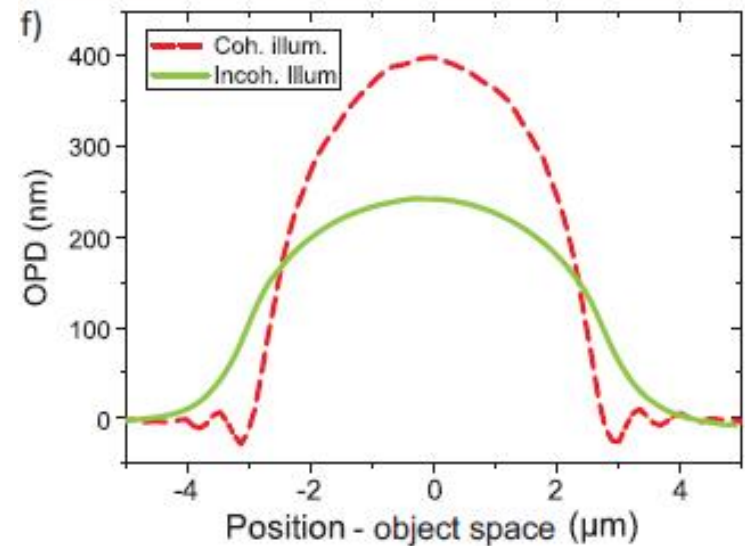
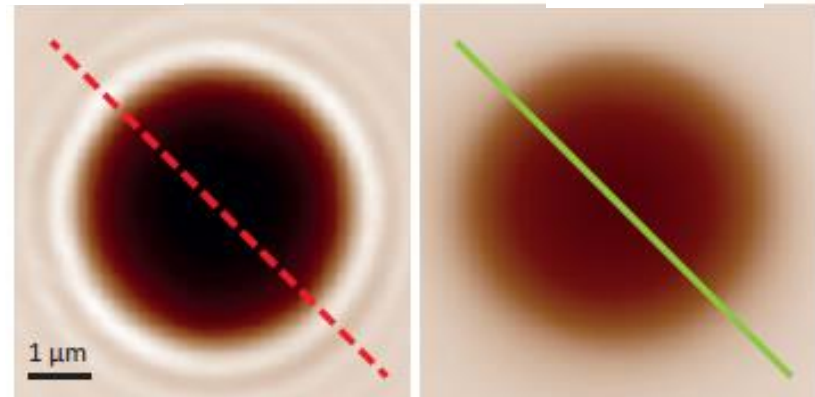


Incoherent illumination

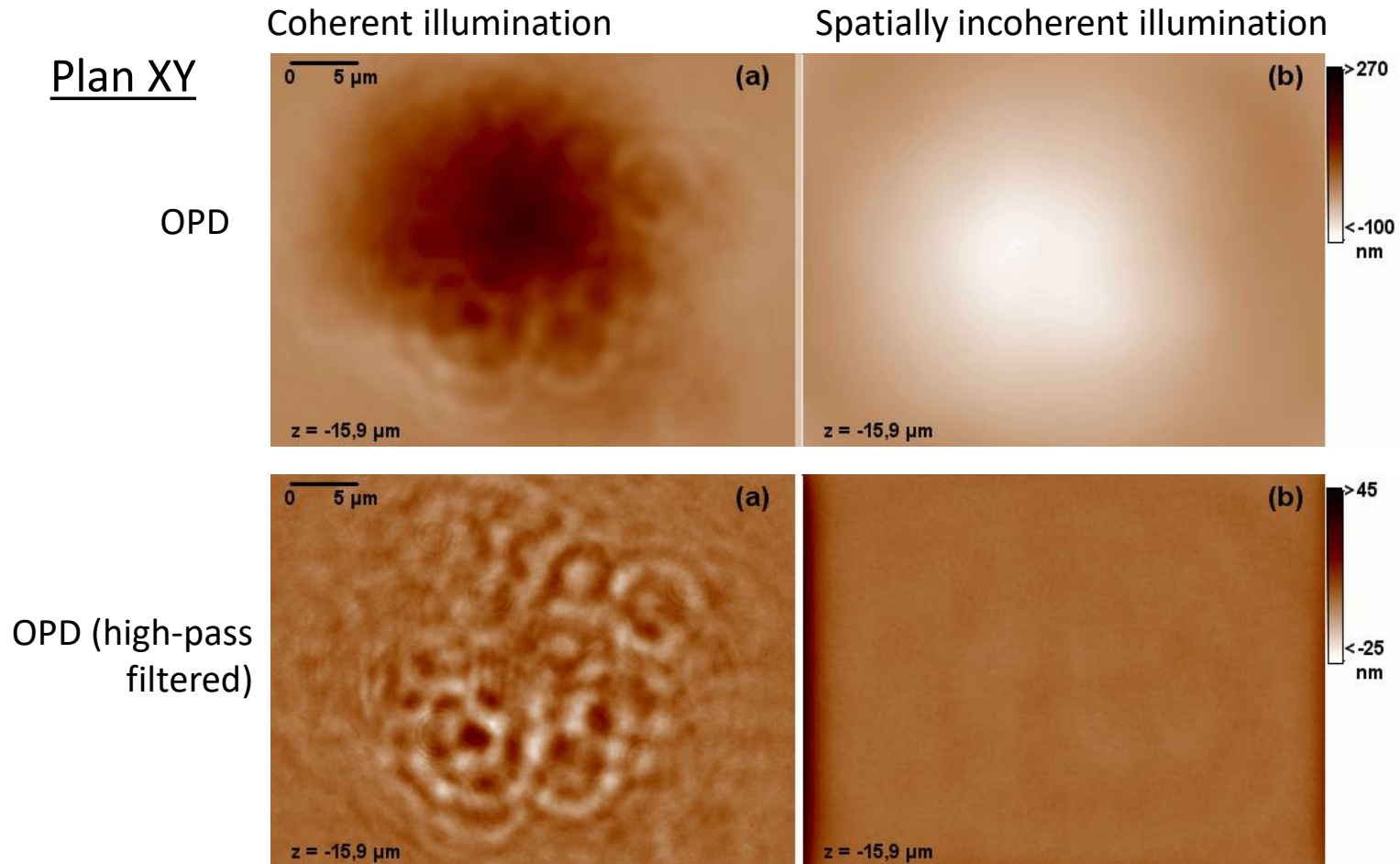


**But Phase MTF drops!**

Coh. Ill.  400 nm -30 Incoh. Ill.



# On biological sample

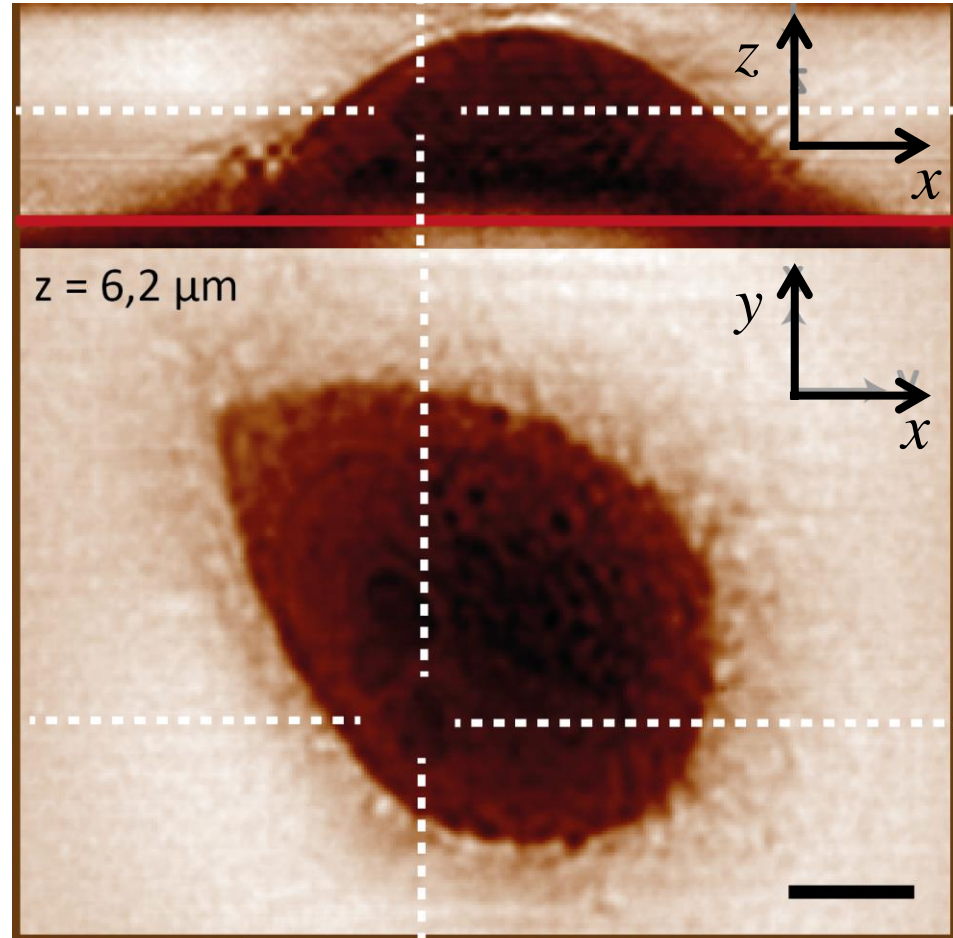
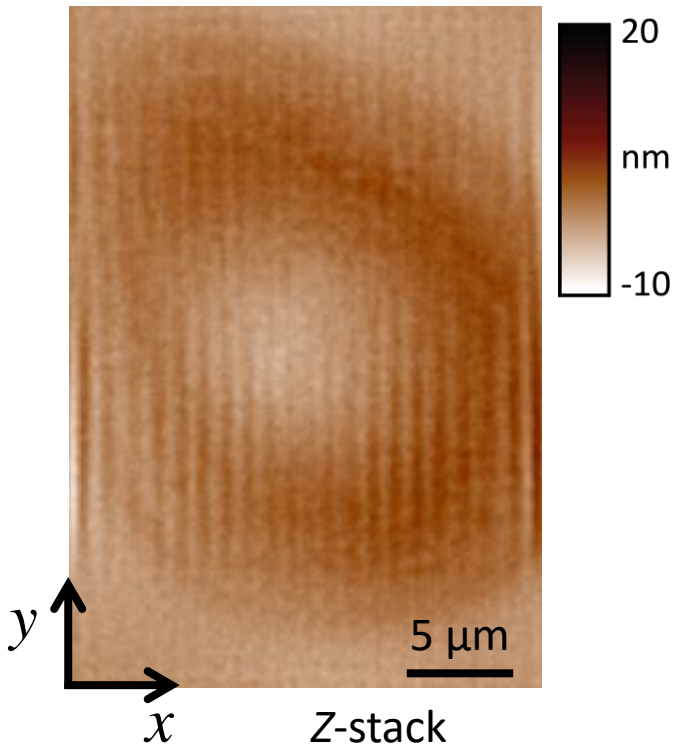


# 3D live cell imaging with incoherent illumination



## Living COS-7 cell

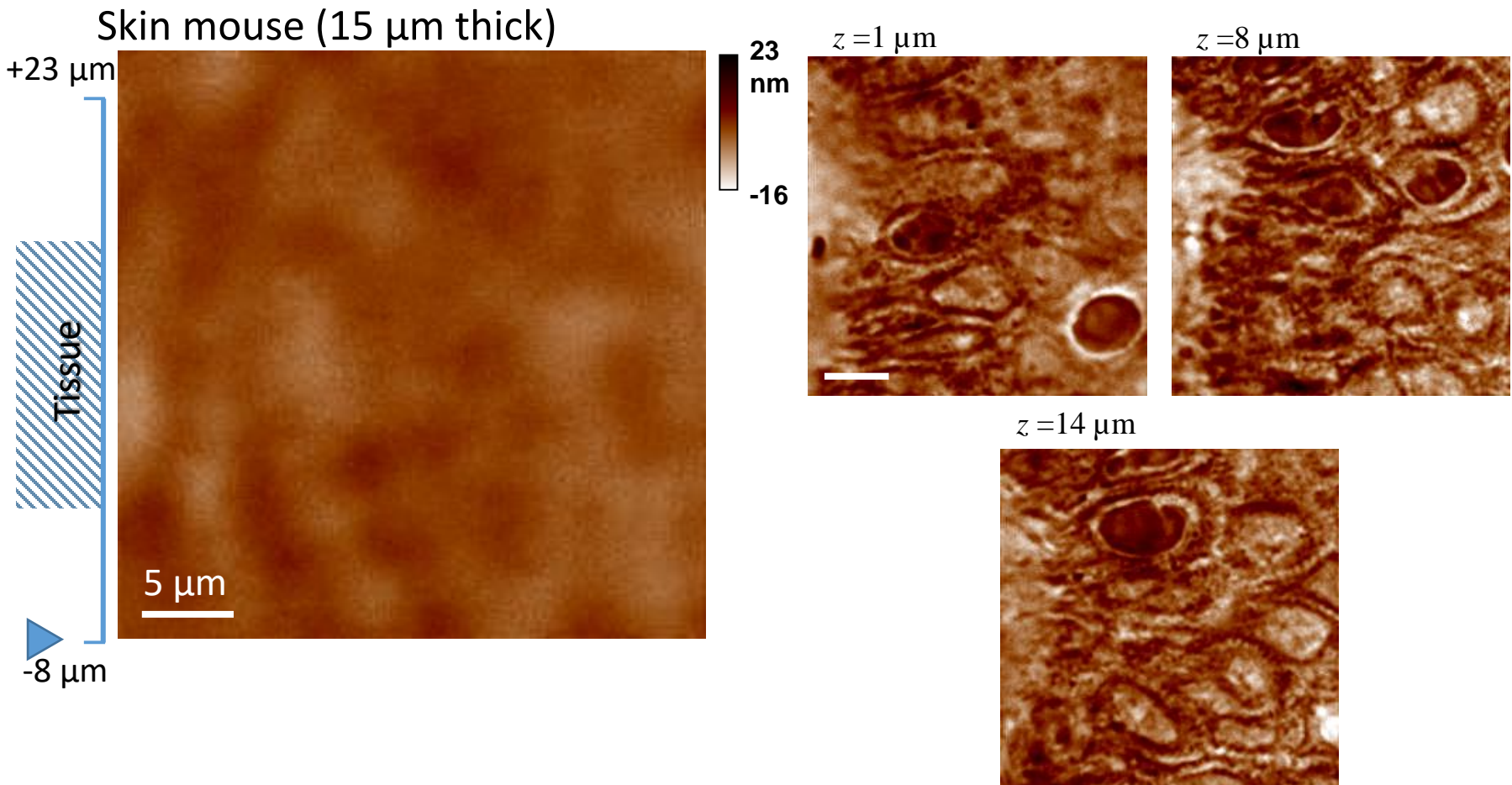
*OPD with spatially Incoh. Illum.  
+ 3D deconvolution*



- ✓ 3D shape of the cell
- ✓ Fast acquisition, compatible with live imaging (just a z-stack!)

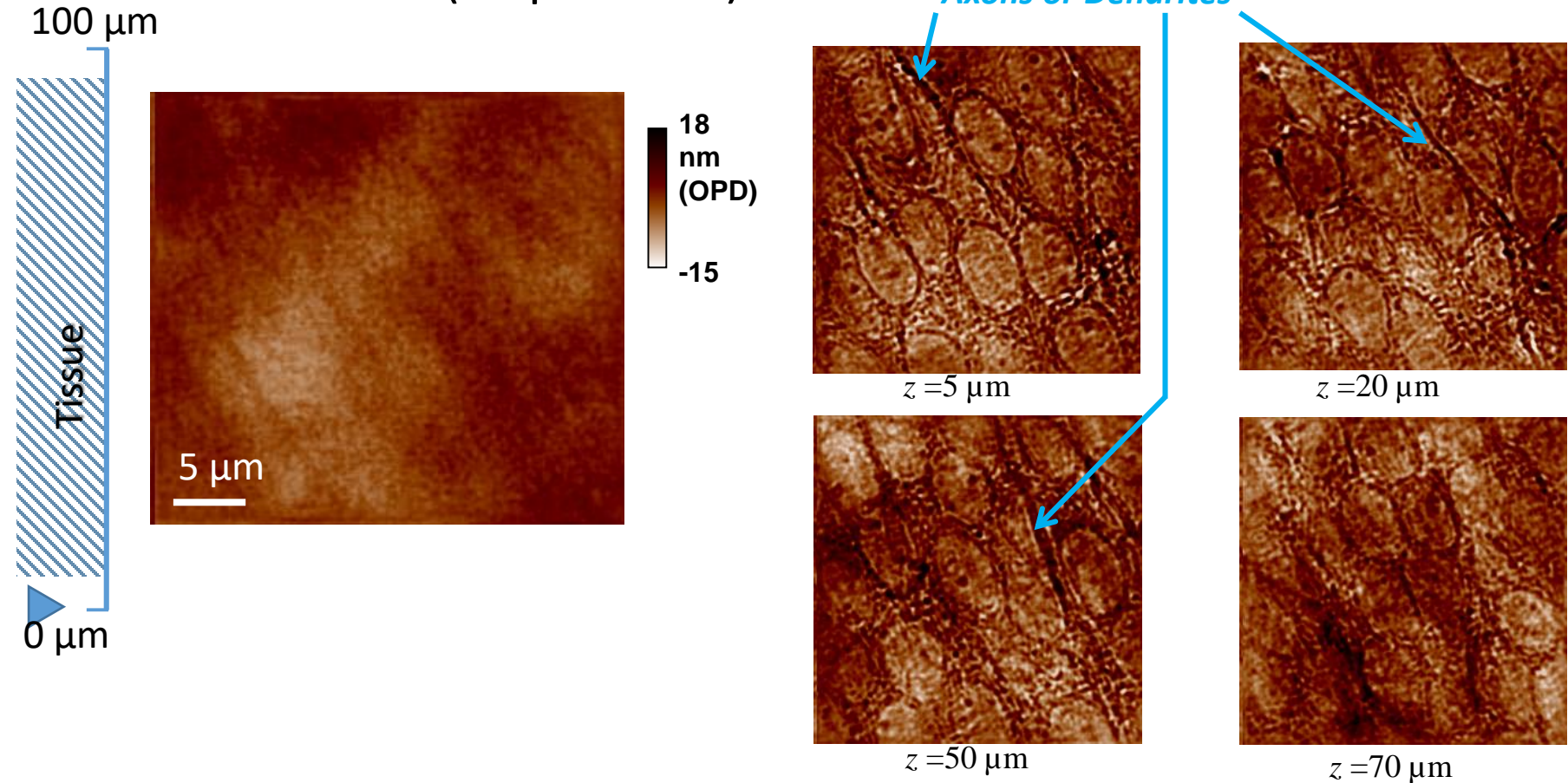


# Fixed tissue imaging (1/2)

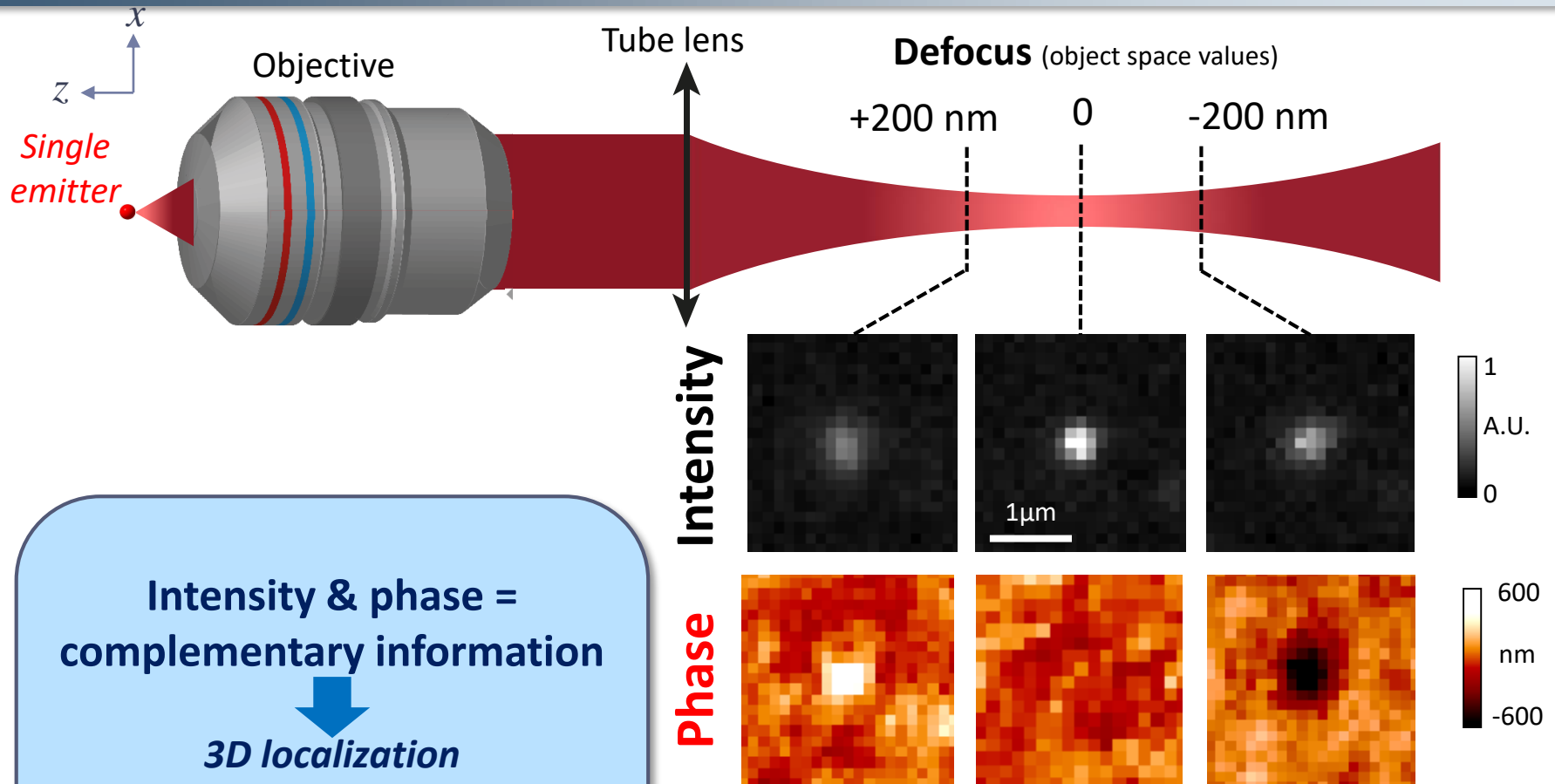


✓ Cell layer visualization without labeling

## Brain slice (90 $\mu\text{m}$ thick)



✓ Thin structures visible even after few tens of microns



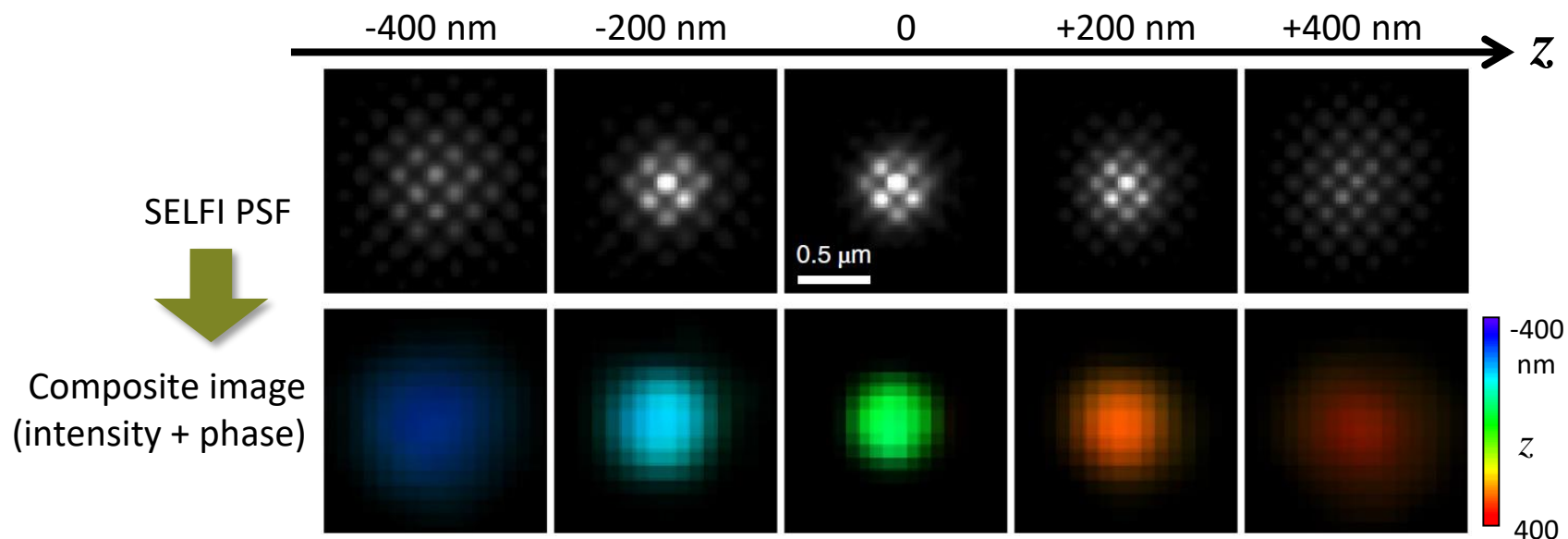
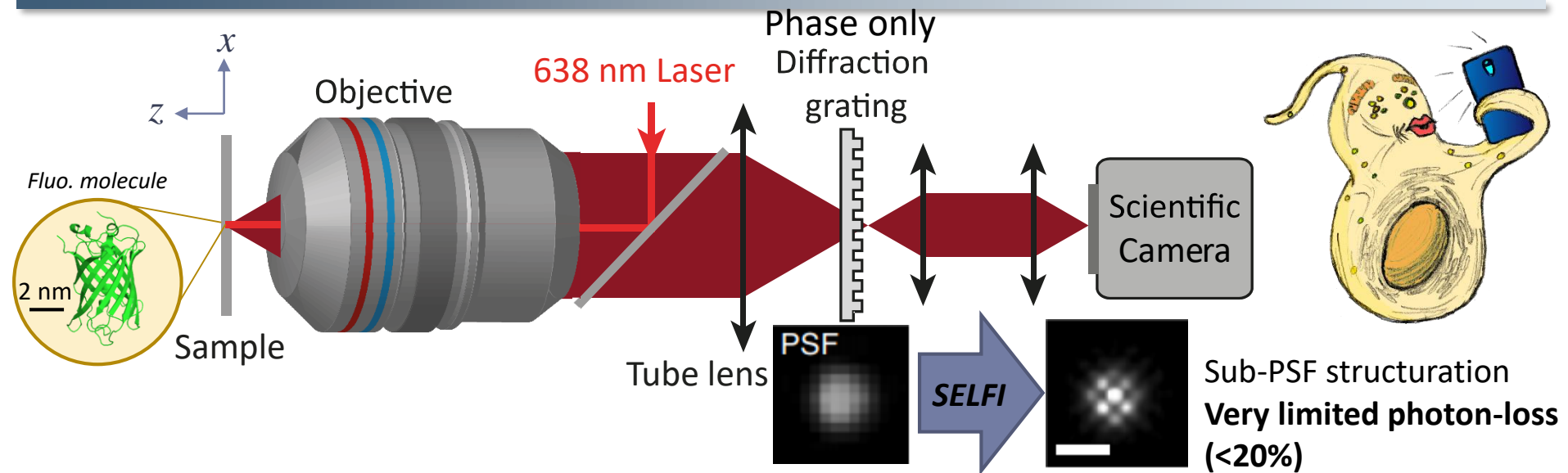
Intensity & phase =  
complementary information

↓  
**3D localization**

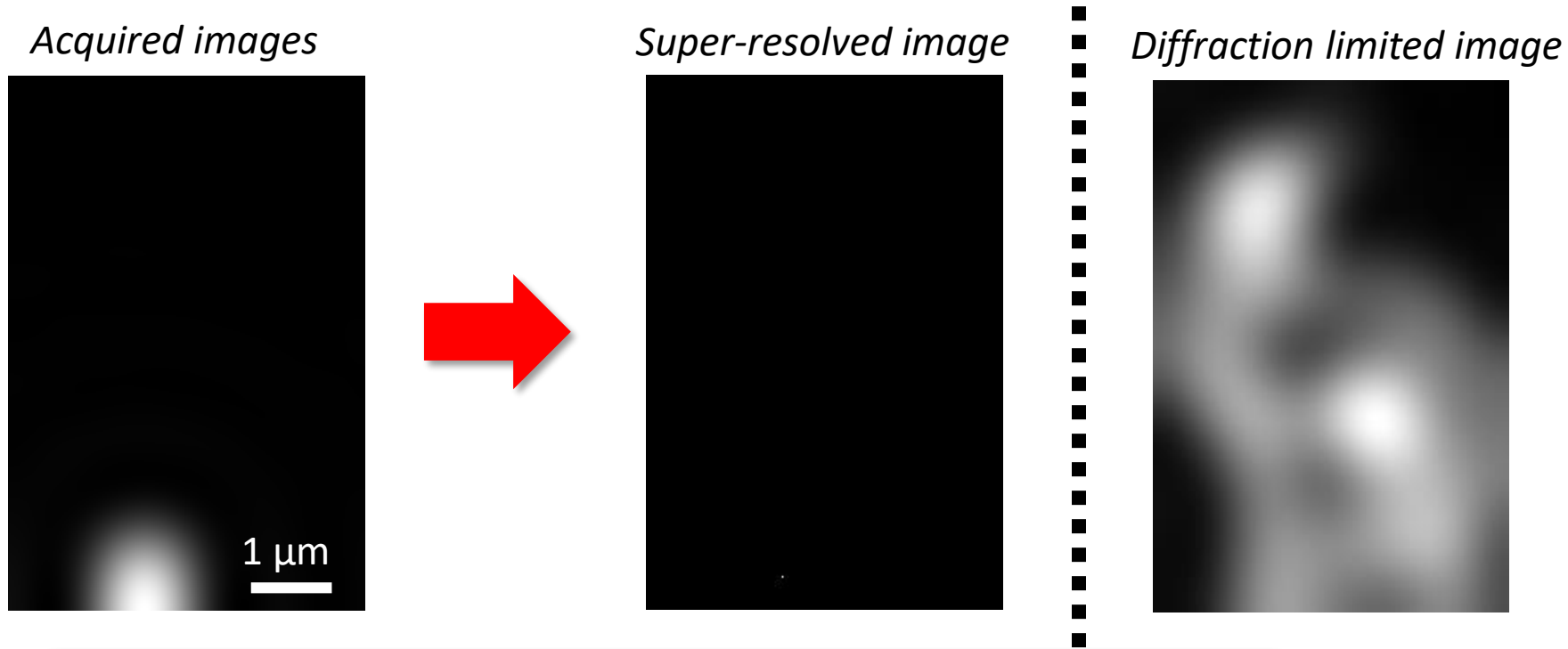
- ✓ **Intensity** = lateral (xy)
- ✓ **Phase** = axial (z)

# « Self-interferences »: SELFI

30



## Single molecule localization for super-resolution



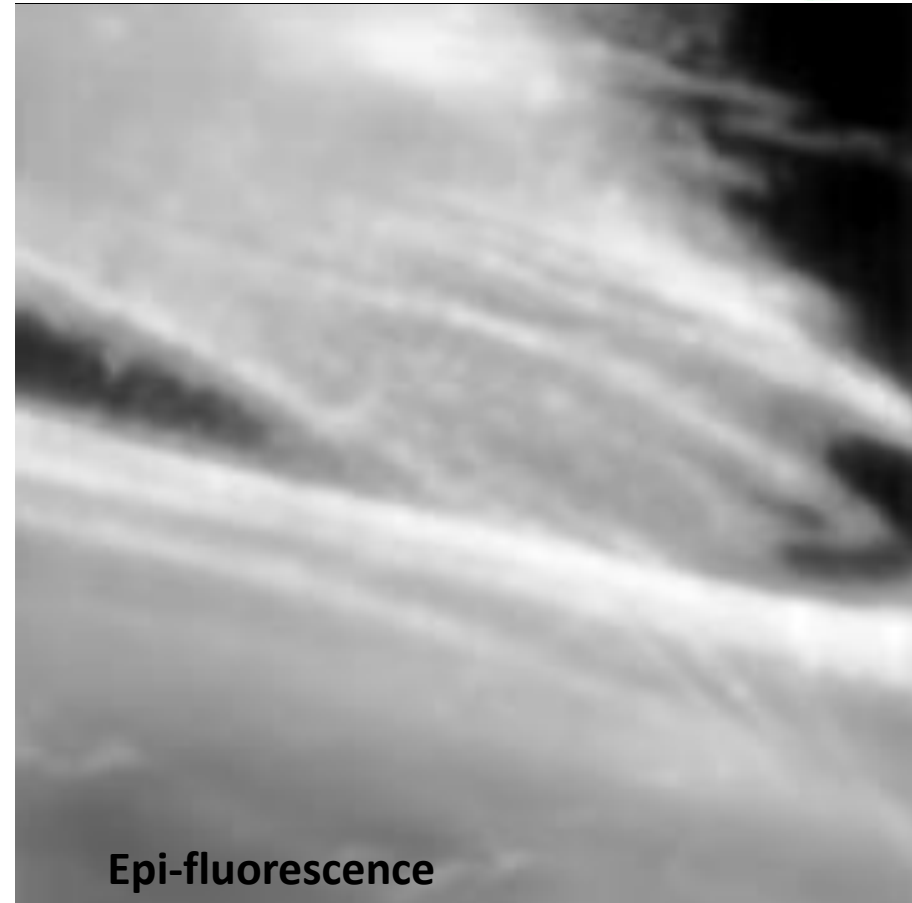
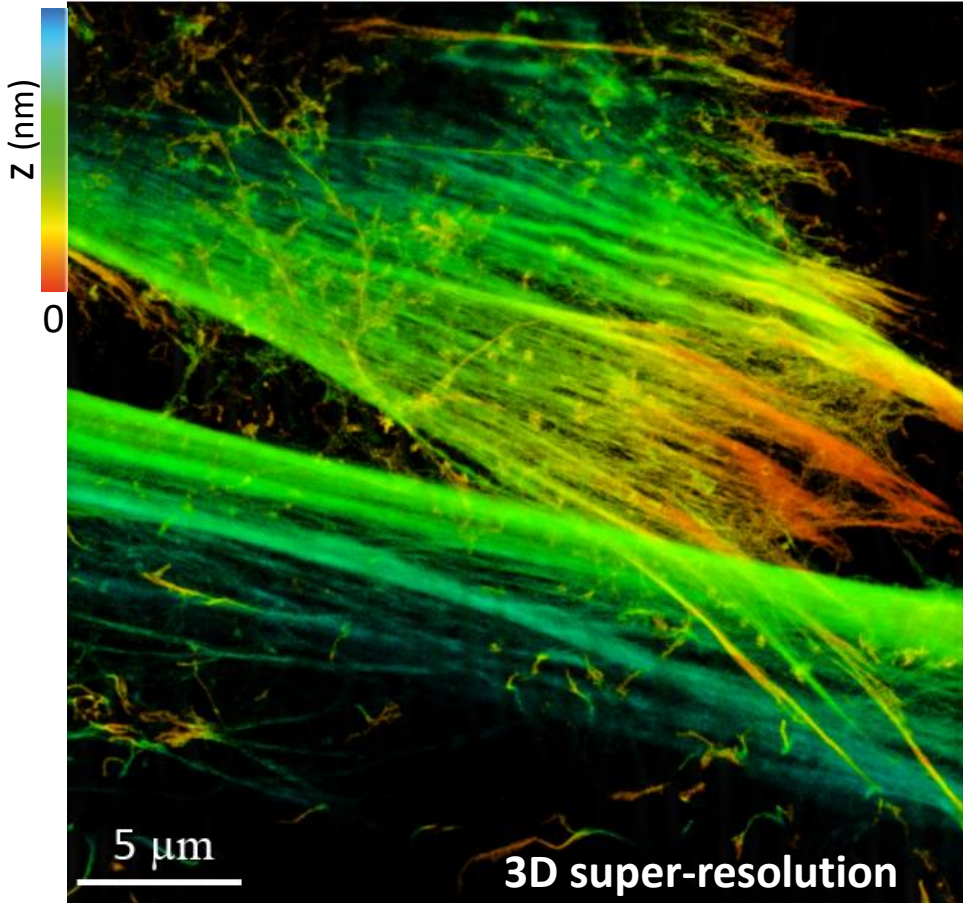
✓ Typical localization precision: 10-20 nm ( $\lambda/30$ )

✗ Long acquisition time (from 10 min up to 48h!)  $\Rightarrow$  sample drifts!



# 3D dSTORM reconstruction with SELFI

660

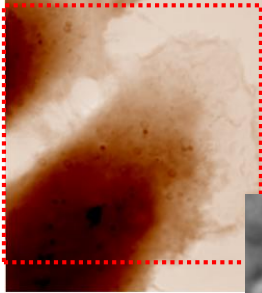


*Human fibroblast, F-actin labelled with A647/Phalloidin*  
*60x NA=1.3, 3D dSTORM imaging **during 8 hours (24M molecules)***



# Live super-resolution & QPI

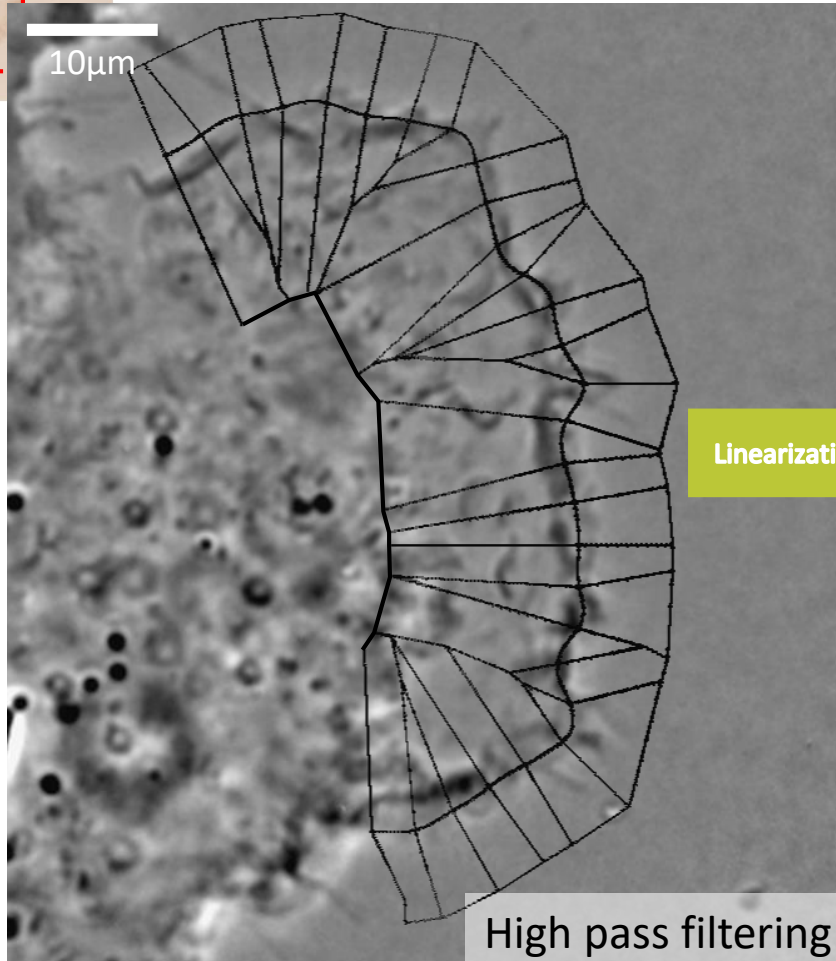
Label free QPI



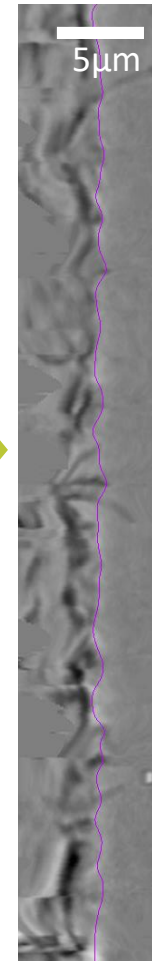
A431 cells

Segmentation

(« camemberisation » of the cell...)

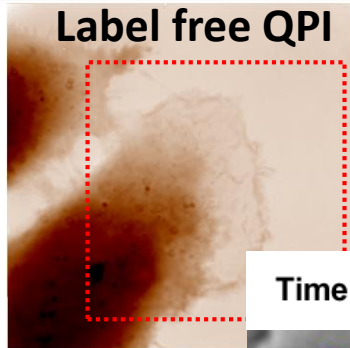


Linearization



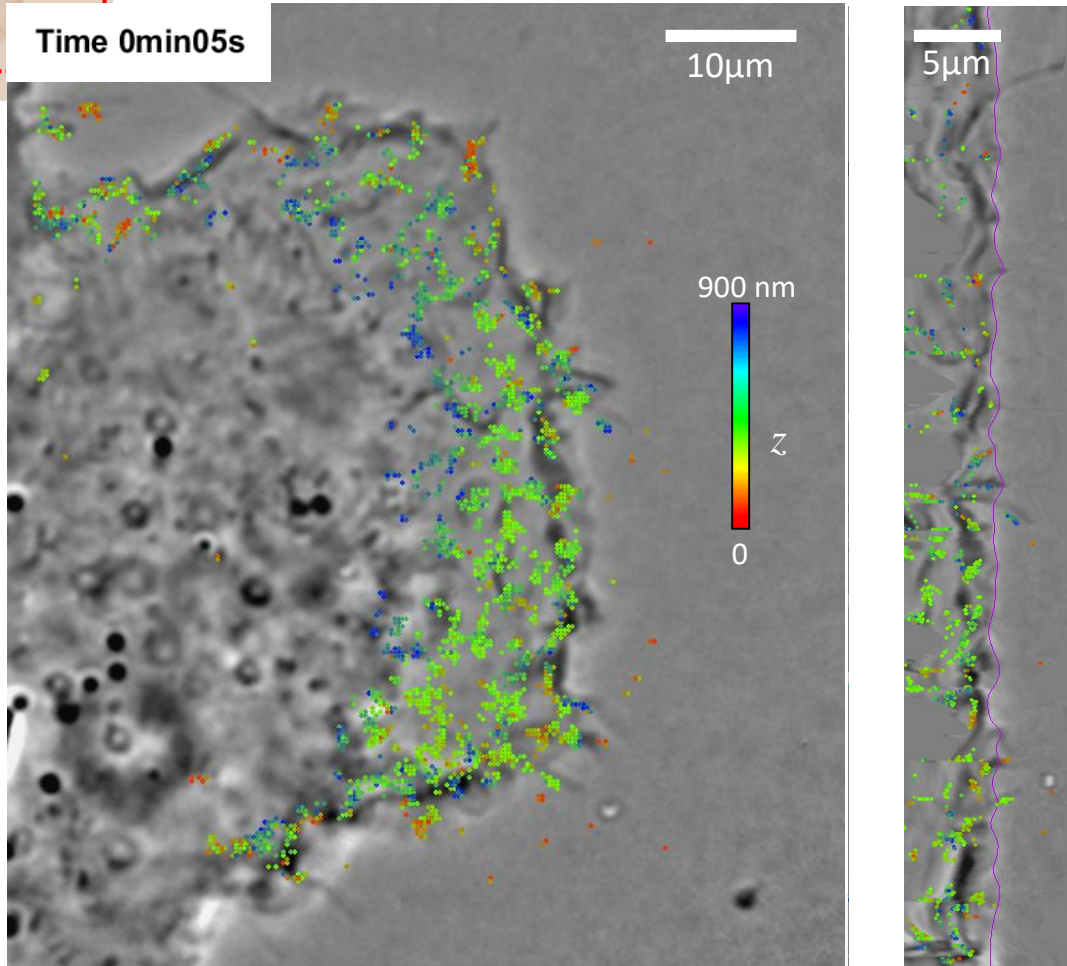


# Live super-resolution & QPI



## 3D super-localization of EGF receptors (uPAINT)

A431 cells



Sub-cellular  
compound  
reference in living  
samples



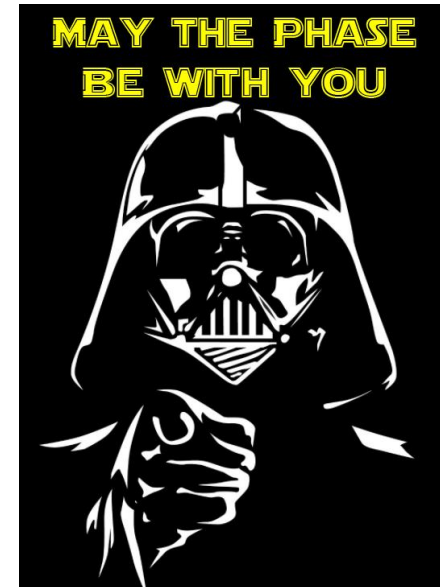
- ▶ Coherence is essential for image formation
- ▶ IDML has the versatility to be applied with any source and imaging scheme

# Thank you for your attention

Team phase



Former members



Collaborators on the presented projects

G. Recher  
A. Badon  
P. Nassoy  
G. Recher  
G. Maucort

A. Mourier  
M. Rojo  
C. David

P. Berto

H. Rigneault  
J. Wenger  
S. Monneret

D. Muriaux  
S. Lyonnais

B. Wattelier  
S. Aknoun

# Session 3: Biologie 1

*Chairman : Serge Monneret*

- *Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie optique. Pierre Bon, XLIM*
- *Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI. Principe, métrologie et applications. Julien Savatier, Institut Fresnel*
- *L'ID4L comme microscopie thermique. Guillaume Baffou, Institut Fresnel*

# Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI Principe, métrologie et applications

Julien Savatier

Première rencontre d'interférométrie à décalage multilatéral  
DIGITEO Saclay, 11-12 mai 2023

# Plan

Pourquoi mesurer la masse sèche des cellules ?

Principe en QWLSI

Un peu de métrologie (quand même)

Applications

Globules rouges

Levures

Cellules de mammifères

Cellules souches

## Pourquoi mesurer la masse sèche (ou la densité) des cellules ?

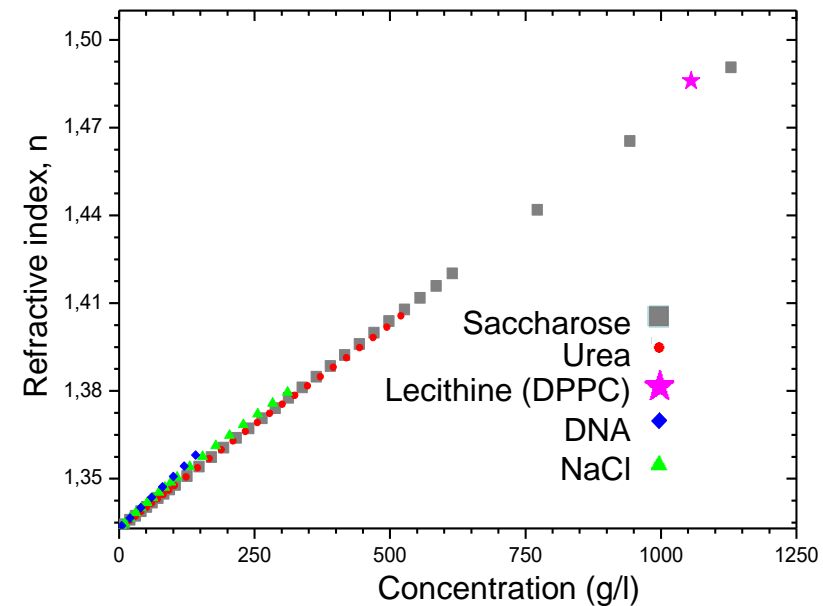
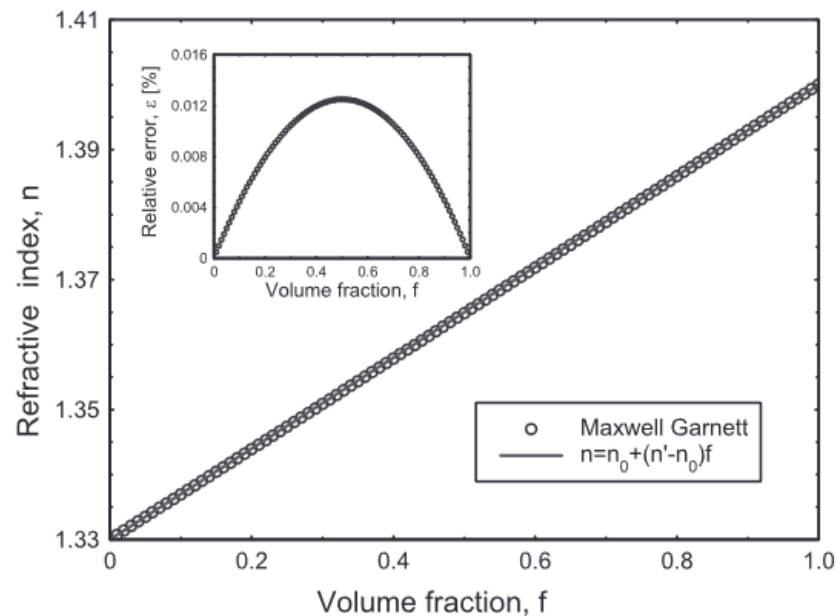
- ✓ Paramètre complexe : signe pour de nombreux processus cellulaires, mais mesure plus précise que le volume pour définir une « taille » cellulaire
- ✓ Cycle cellulaire, lui-même fonction de nombreux facteurs
- ✓ Lien avec le volume cellulaire, et contrôle des deux
- ✓ Métabolisme et taux de croissance
- ✓ Mort cellulaire
- ✓ Effets de drogues
- ✓ Effets de modifications génétiques
- ✓ Impact de maladies (cancer)
- ✓ A l'échelle individuelle ou populationnelle

# Principe en imagerie de phase quantitative (QPI)

$$m_{s\grave{e}che} = \frac{1}{\alpha} \iint_{cell} n \cdot e \cdot dS = \frac{1}{\alpha} \iint_{cell} OPD \cdot dS$$

$\alpha = 0.18 \mu\text{m}^3/\text{pg}$  pour les cellules eucaryotes (Barer, Nature, 1952)

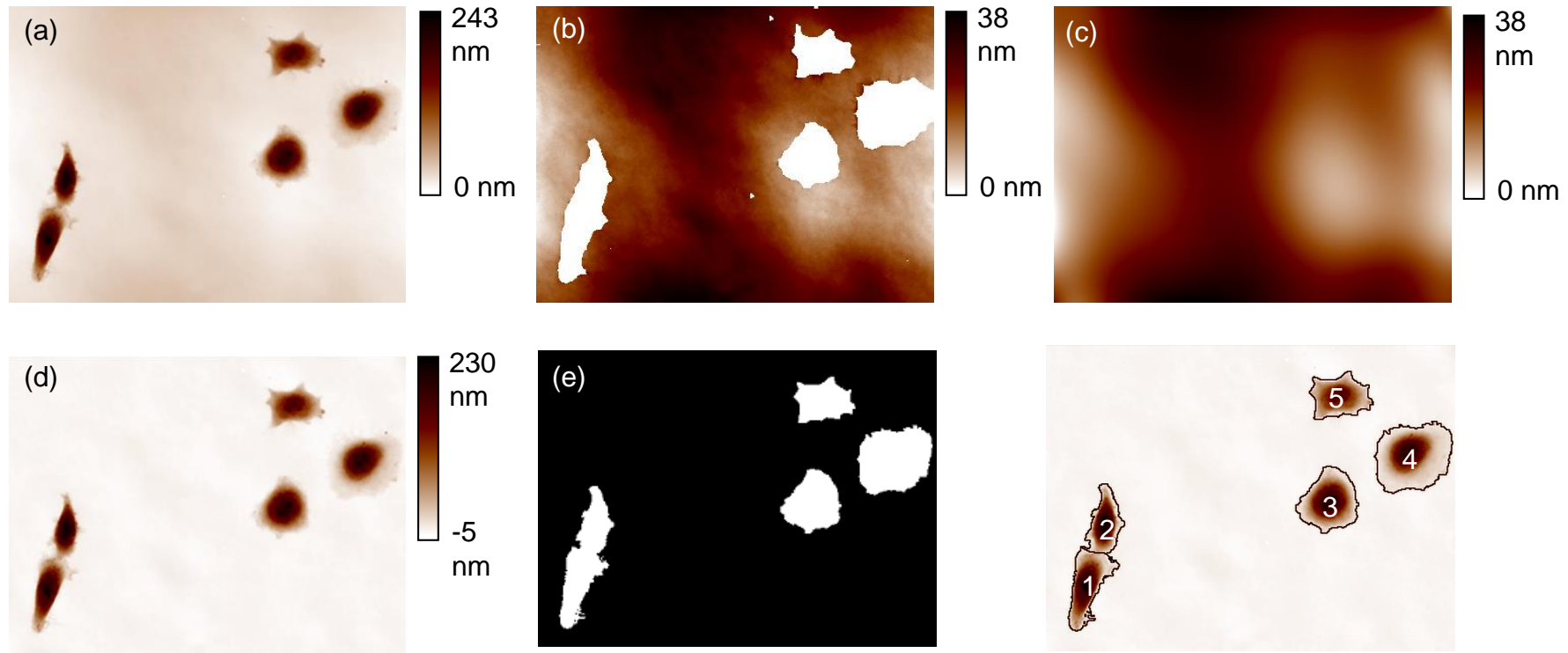
$$Densit\acute{e} = \frac{m_{s\grave{e}che}}{S}$$



# Principe en QWLSI

Segmentation automatique, aplanissement du fond

Collaboration F. Galland





# Métrologie

Sources possibles d'incertitude

Bruit de mesure de l'OPD

Erreurs de segmentation

Position de l'objet dans le champ

Confluence cellulaire

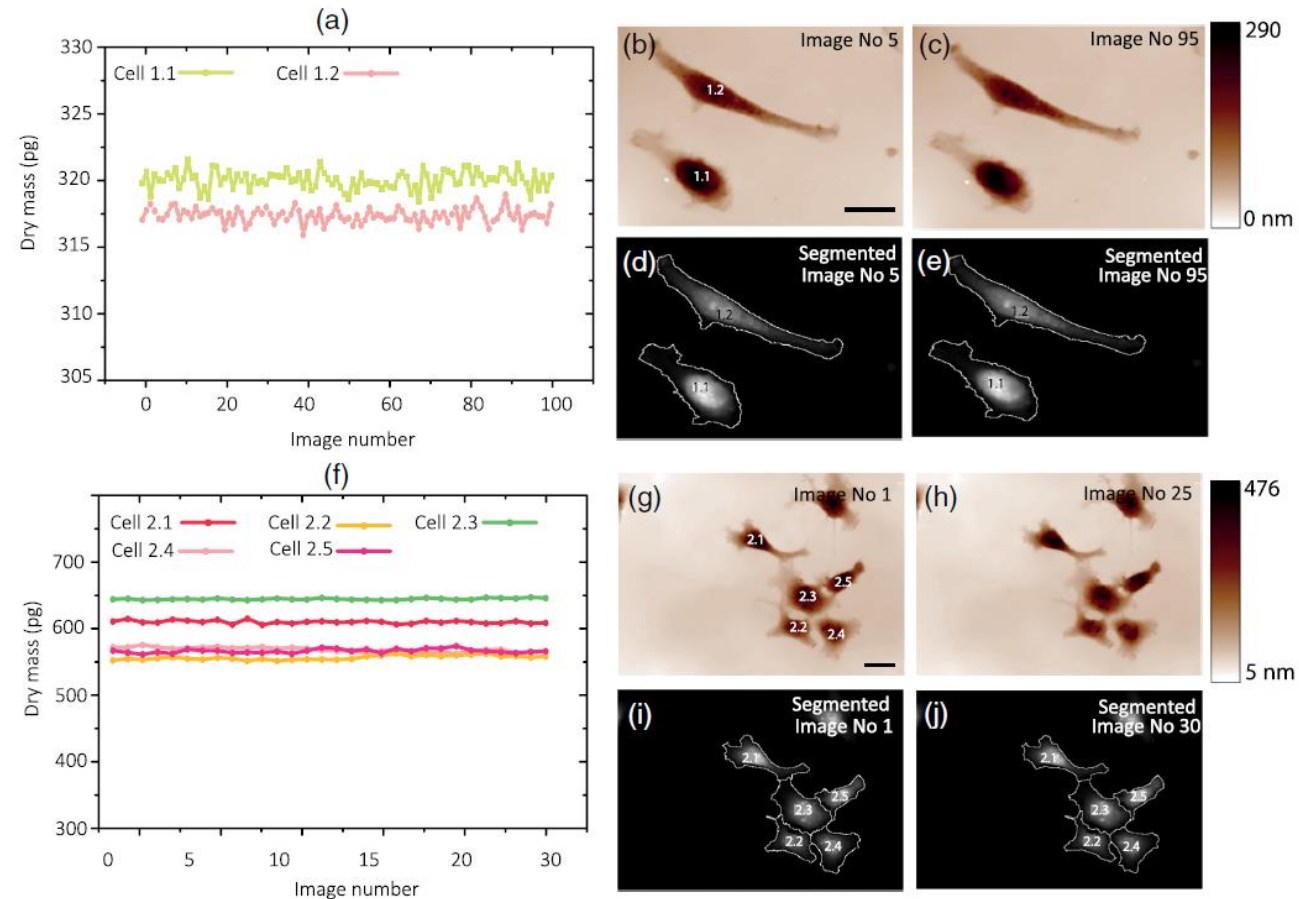
Grossissement et ouverture numérique

Cohérence de l'illumination

Focus

# Métrologie

## Qualité de la segmentation



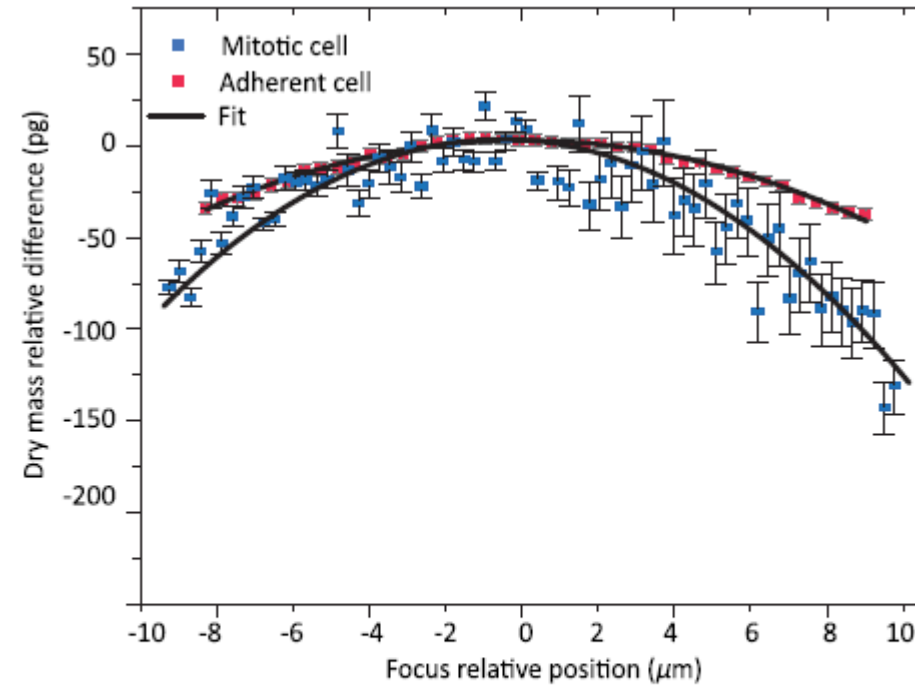
**Fig. 3** Graphic representation of the dry mass fluctuations for (a) two HeLa cells and (f) five confluent COS-7 cells. (b), (c), (g), and (h) Raw OPD images. (d), (e), (i), and (j) Segmentation results of OPD images presented in (b), (c), (g), and (h).

# Métrologie

## Focus

Flat cell :  $\pm 5 \mu\text{m}$   
to stay  $<1\%$  of dry  
mass variation

Mitotic cell :  $\pm 2 \mu\text{m}$



**Fig. 10** Results of the relative dry mass evolution with the focus relative position of a mitotic  $40\text{-}\mu\text{m}$  diameter and an adherent COS-7 cell. The error bars were calculated by evaluating the standard deviation value of a  $50 \times 50$  pixel area of the image.

# Comparaison avec d'autres techniques de QPI

## Lens Free Microscopy vs DHM vs QLSI

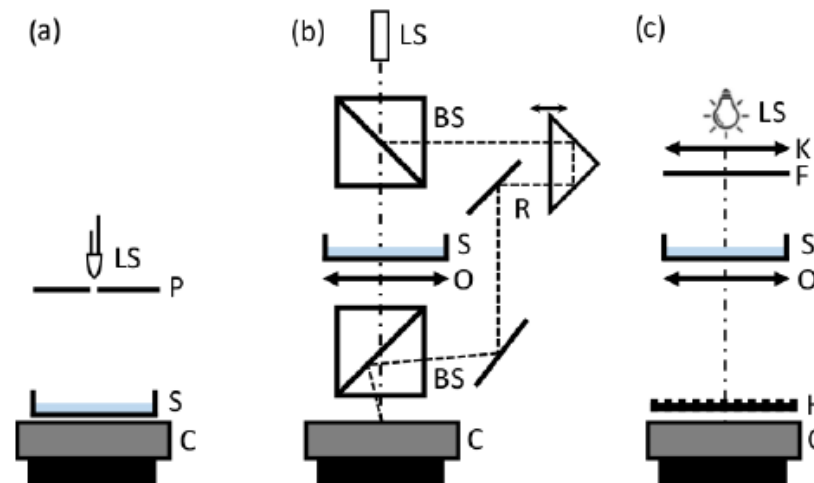


Fig. 1. Optical setups a) LFM b) DHM c) LSI. LS light source, P pinhole, S sample, C camera, O microscope objective, BS beam splitter, R variable length reference arm, K Kohler illumination system, F band-pass filter, H modified Hartmann mask. Note that light source is partially coherent for LSI (Kohler illumination), and LFM (LED with a pinhole) and coherent (laser) for DHM (b). Modified Hartmann mask H and camera C in (c) compose the Phasics camera mounted on a standard wide-field microscope.

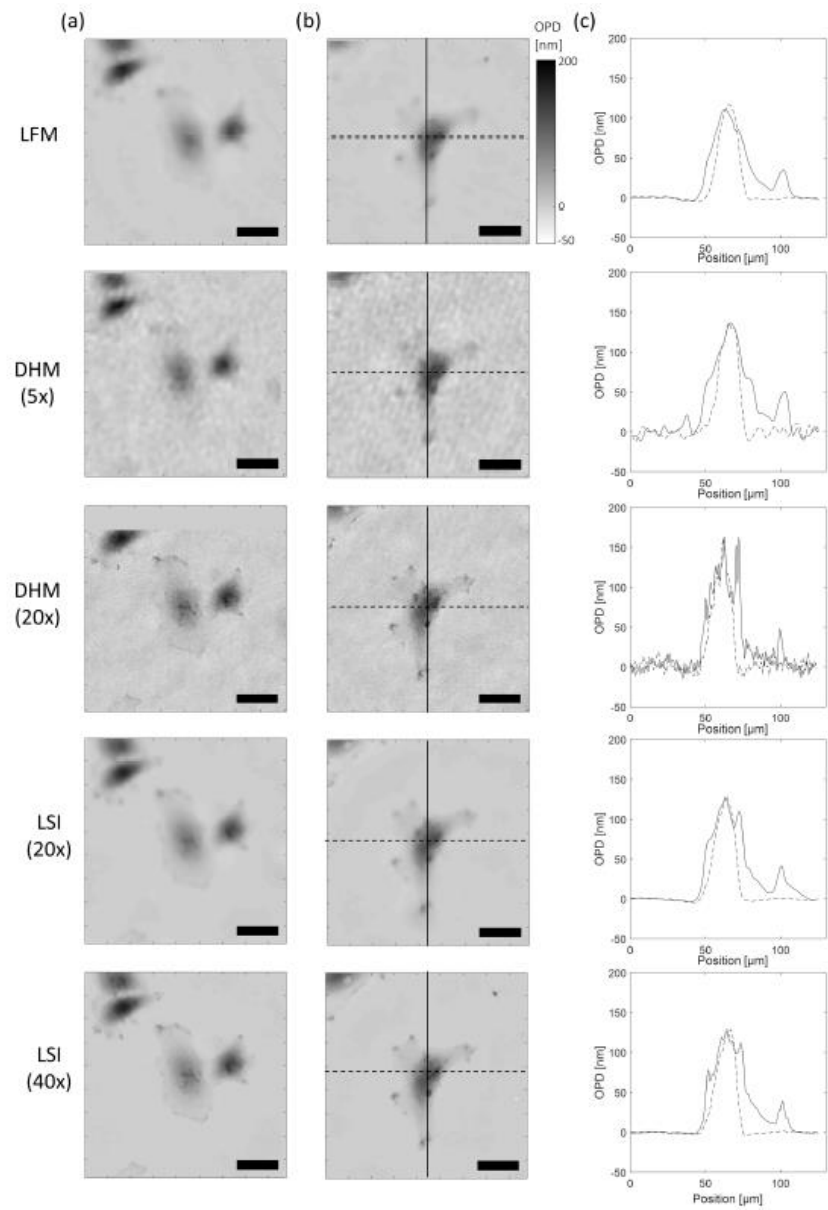


Fig. 2. (a, b) OPD maps of the same fixed COS-7 cells obtained with the different techniques. Scale bar is  $25 \mu\text{m}$ . (c) OPD profiles measured through the cell center in (b) (solid line: vertical, dashed line: horizontal).

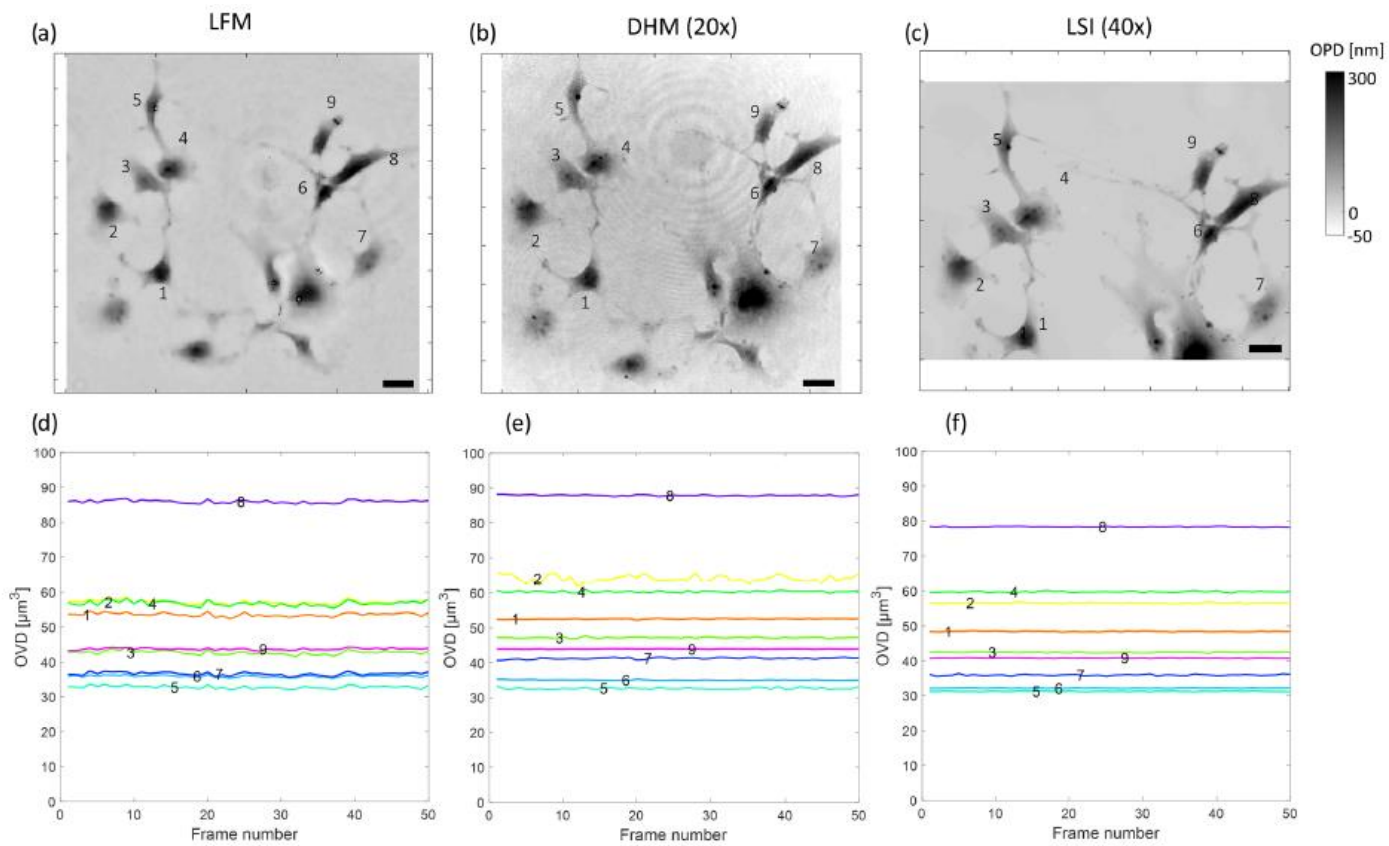


Fig. 6. (a, b, c) OPD image of fixed COS-7 cells obtained with (a) LFM, (b) DHM(20 $\times$ ) and (c) LSI(40 $\times$ ). The 9 cells of interest are numbered. (d, e, f) OVD measured on the 9 cells of interest over 50 consecutive acquisitions with LFM, DHM(20 $\times$ ) and LSI(40 $\times$ ).

# Métrologie

## Sources possibles d'incertitude

Bruit de mesure de l'OPD : bruit spatial = 0,38 nm, bruit temporel = 0,27 nm,  
répétabilité : 0,47 nm

Erreurs de segmentation : 0,12 à 0,47% d'erreur sur la masse, selon la confluence  
et la superposition

Position de l'objet dans le champ : <1% d'erreur, plus d'erreur à faible  
grossissement, négligeable à fort

Confluence cellulaire : **si superposition, difficile si cellules statiques**

Grossissement : insensible

Cohérence spatial de l'illumination : insensible si grossissement pas < 10X

Focus : faible si on reste dans une zone définie, connue, en fonction de la  
morphologie cellulaire

# Application métrologique

## Globules rouges

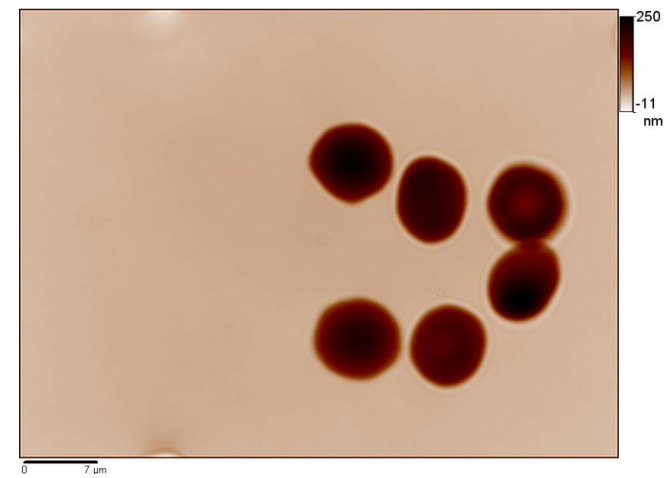
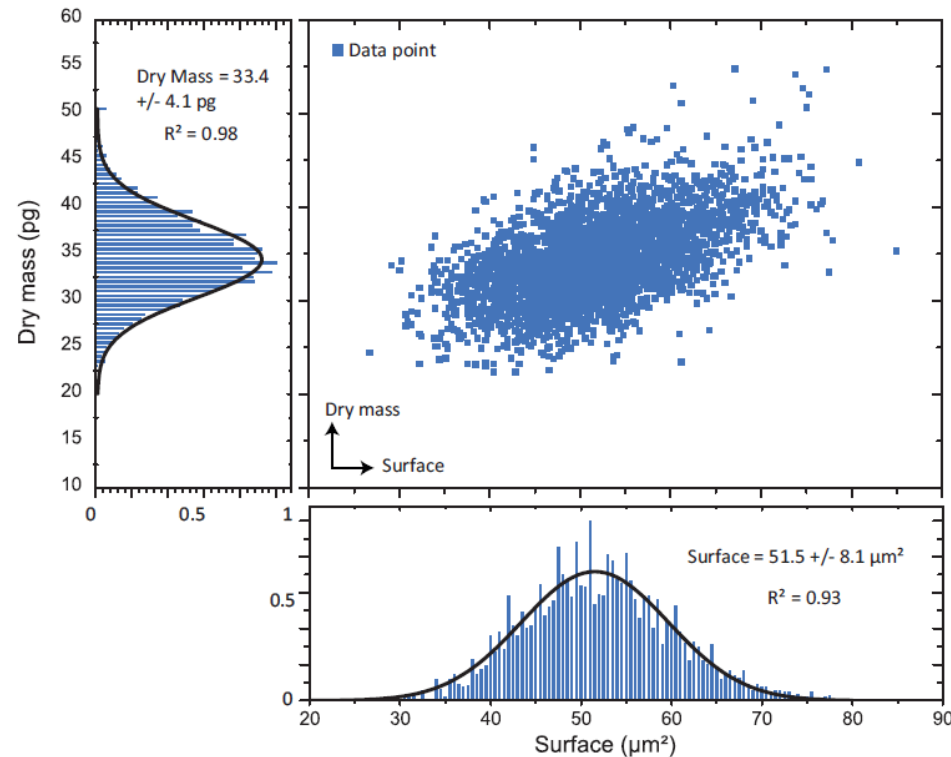


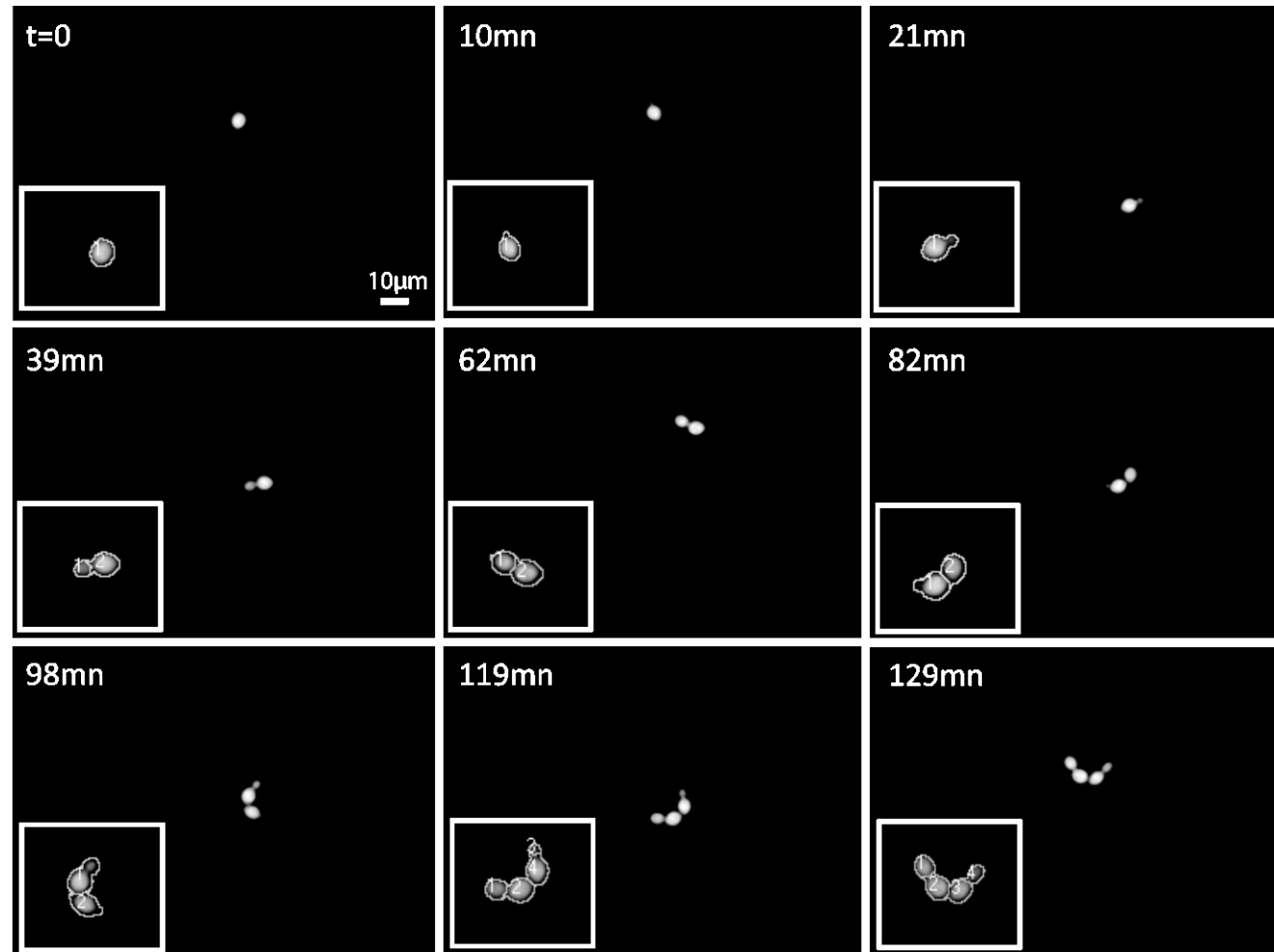
Fig 12: Red blood cells dry mass function of the surface and population repartitions in function of, respectively, the dry mass and the surface. Statistics were made on a population composed by 3220 red blood cells and imaging with a 63x magnification.



# Cycles cellulaire : levures

*S. cerevisiae*, levure bourgeonnante

Haploïde, 16  
chromosomes,  
en phase  
exponentielle

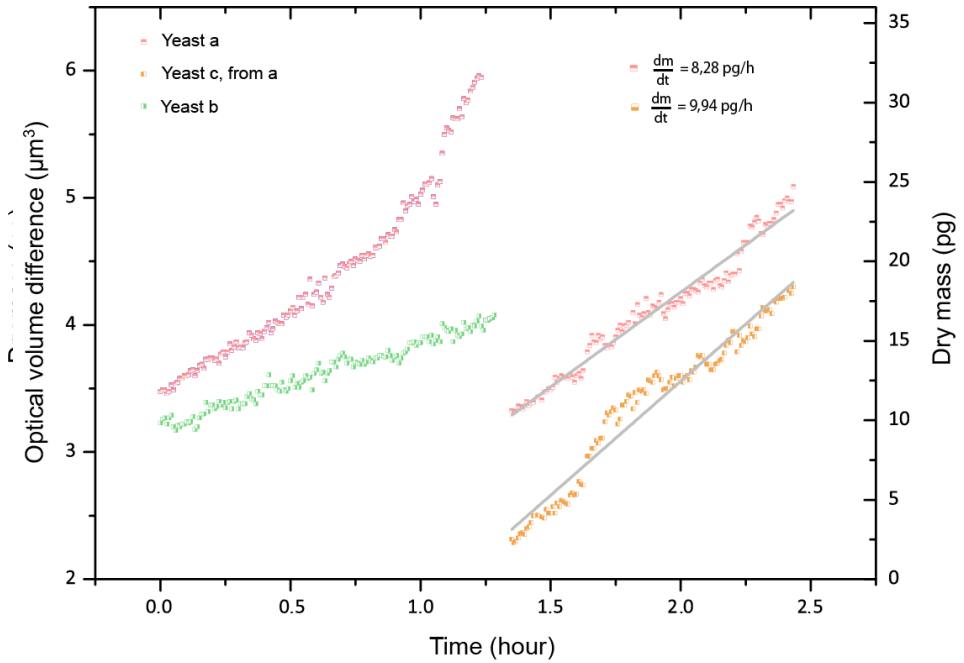
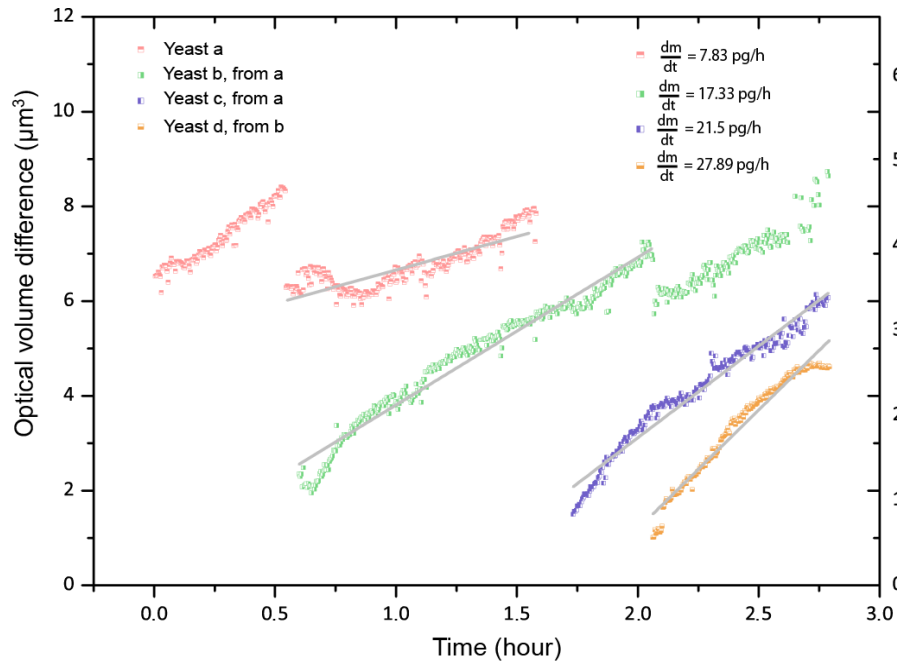
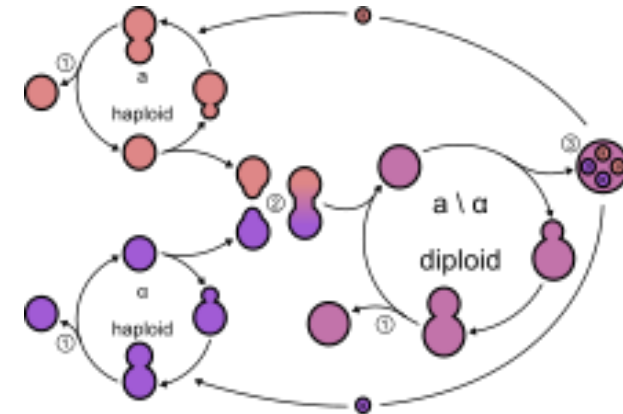


# Cycle cellulaire

*S. cerevisiae*, levure bourgeonnante

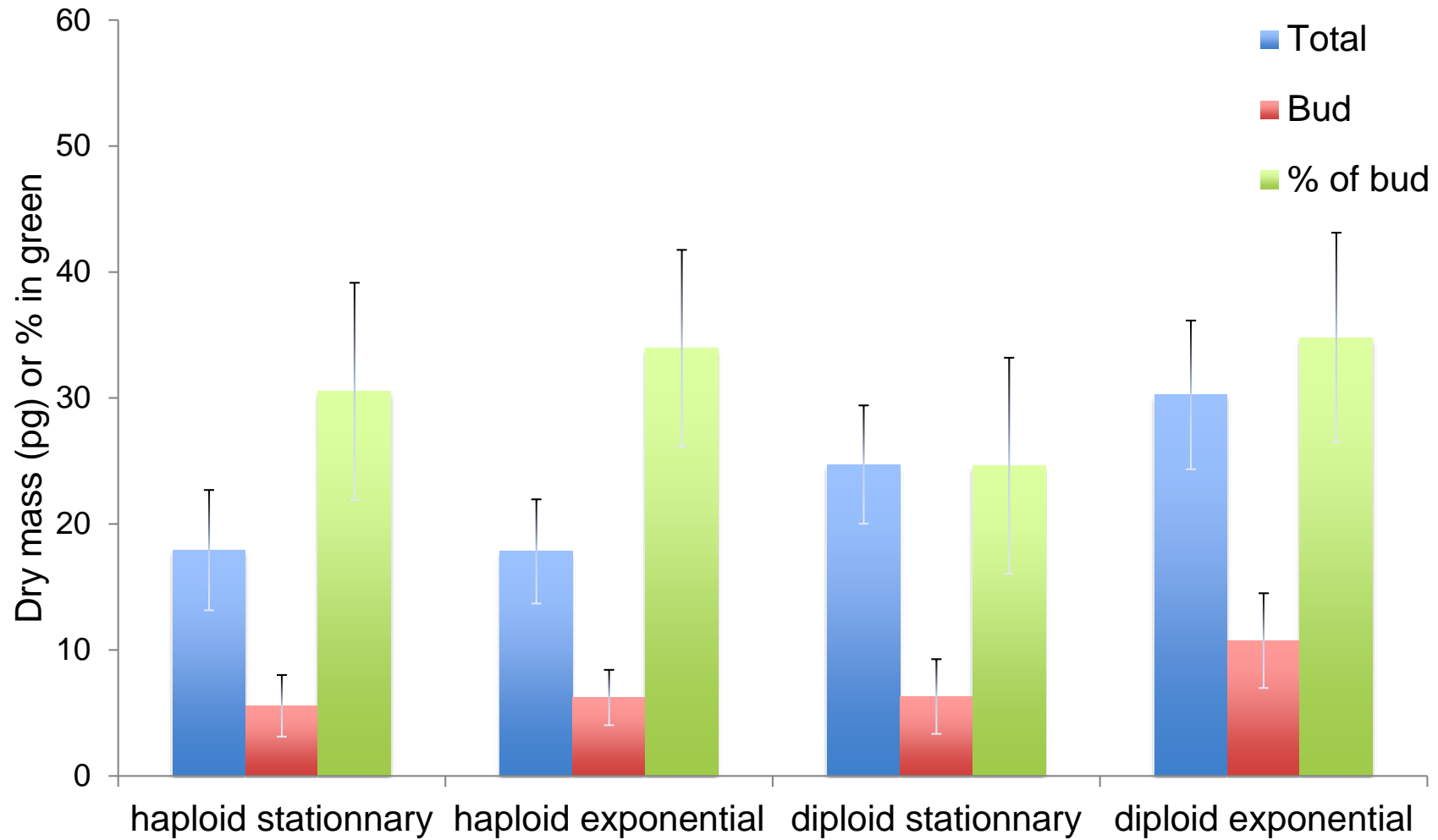
Diploïde, 32 chromosomes  
phase exponentielle

phase stationnaire



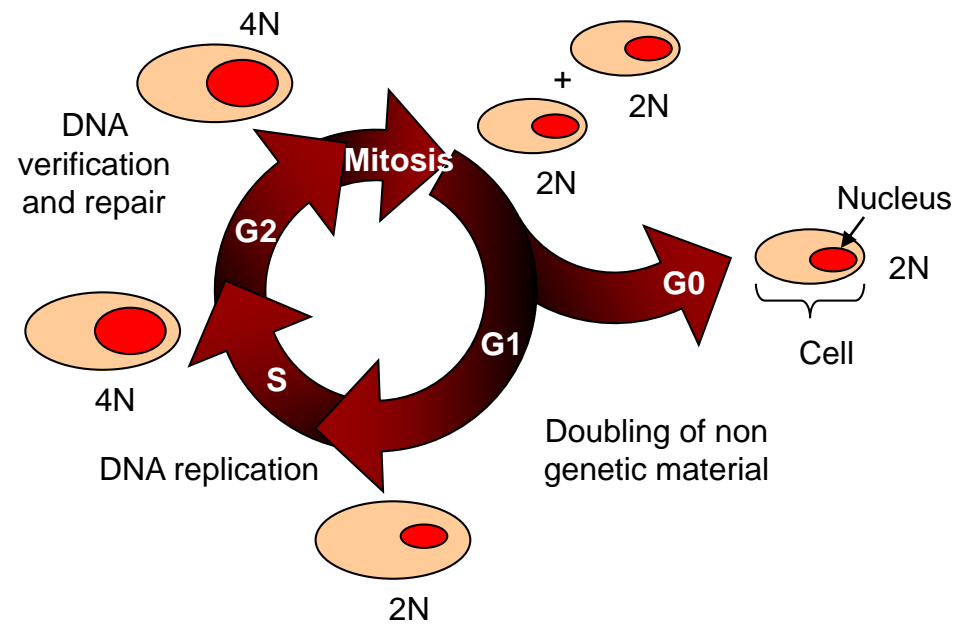
# Cycle cellulaire

*S. cerevisiae*, levure bourgeonnante



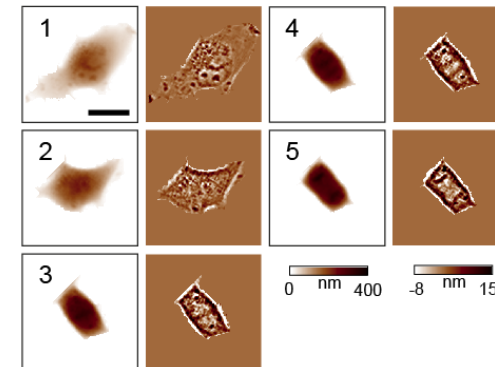
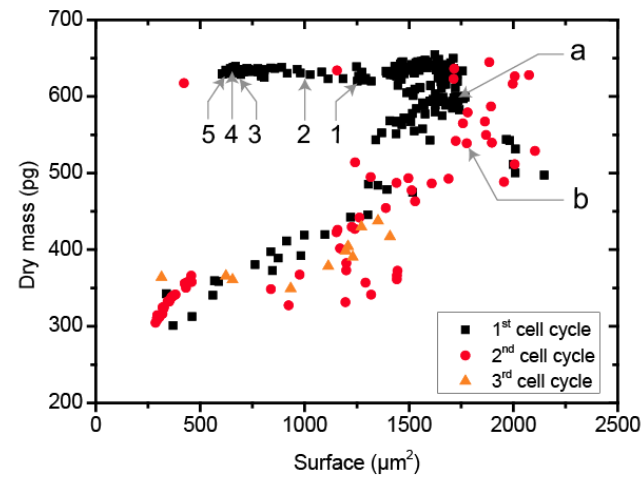
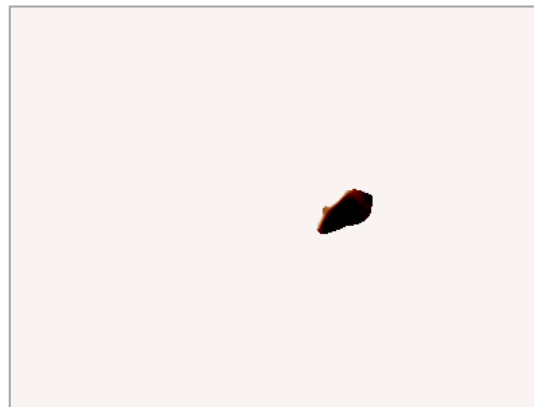
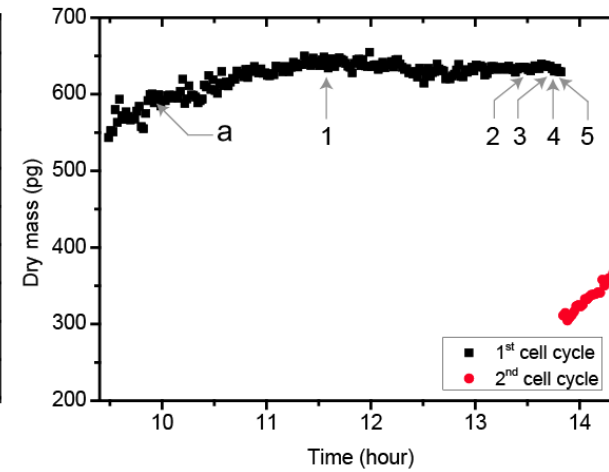
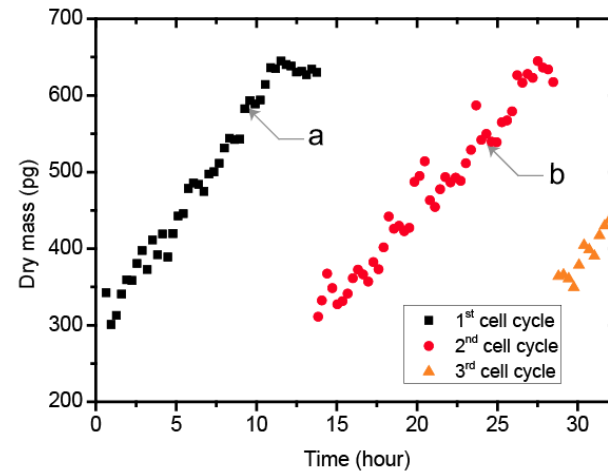
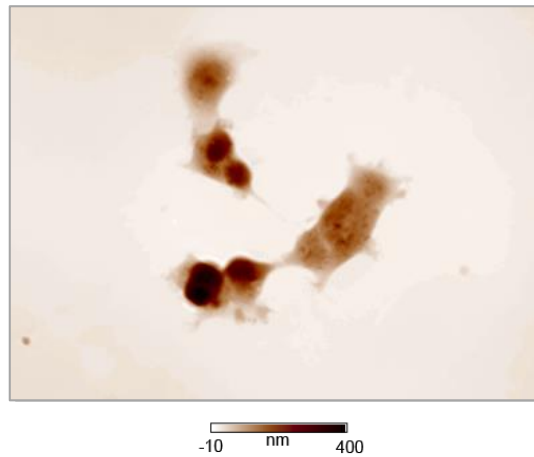
# Cycle cellulaire

Cellules de mammifères



# Cycle cellulaire

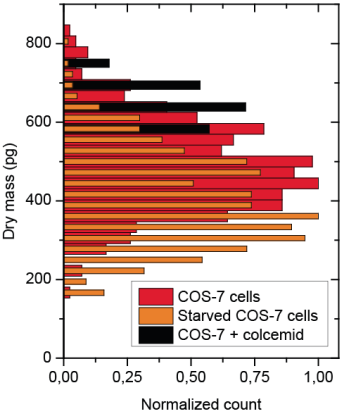
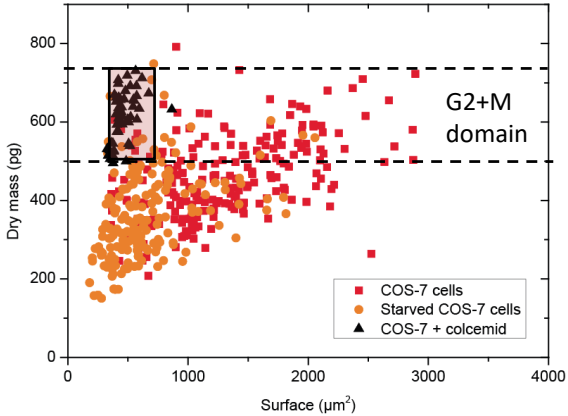
## Suivi de cellule unique



COS-7 cell, followed 34 hours at 37°C + 5% CO<sub>2</sub>

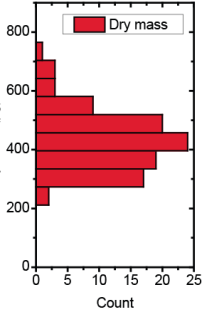
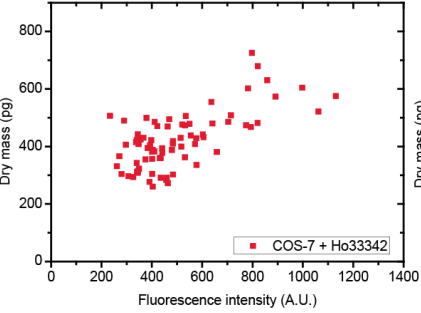
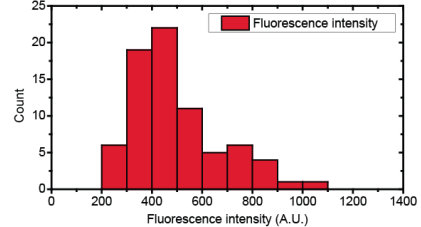
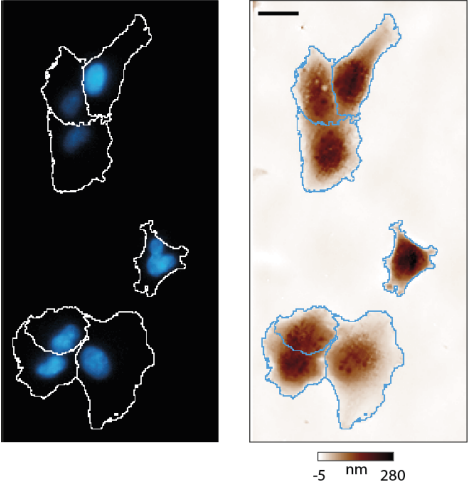
1 image every 30 sec. 40x 0.75 N.A. Scale bars : 20  $\mu\text{m}$

# Population cellulaire de COS-7



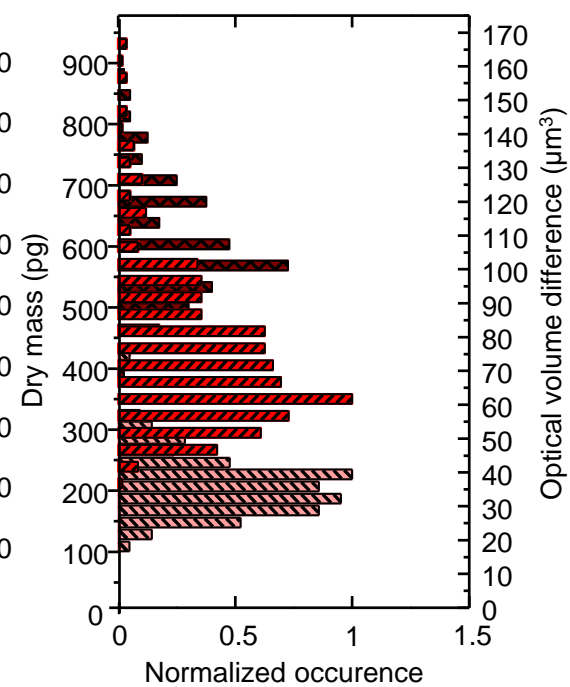
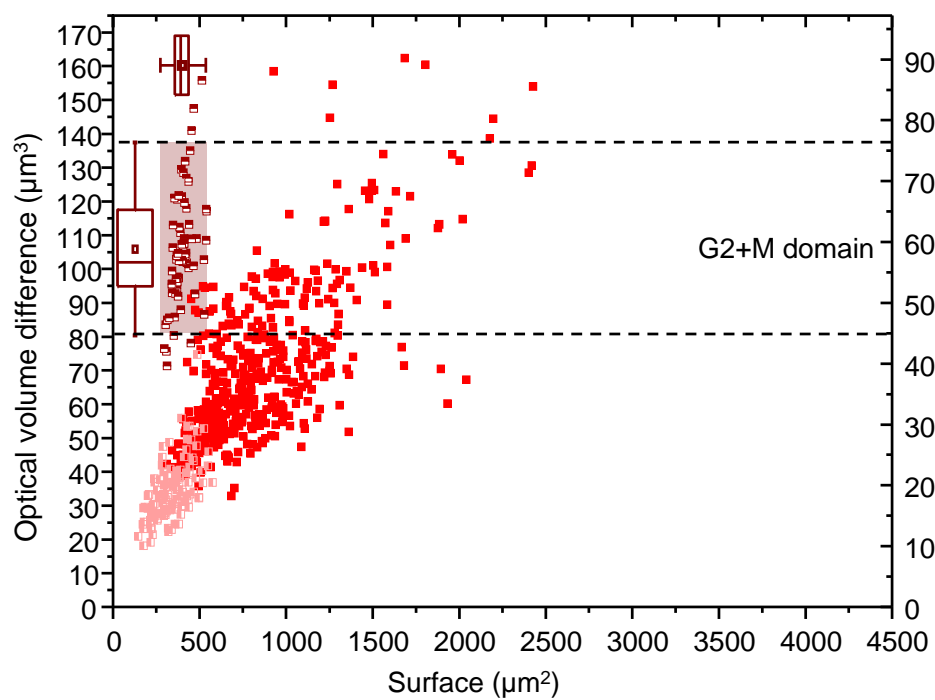
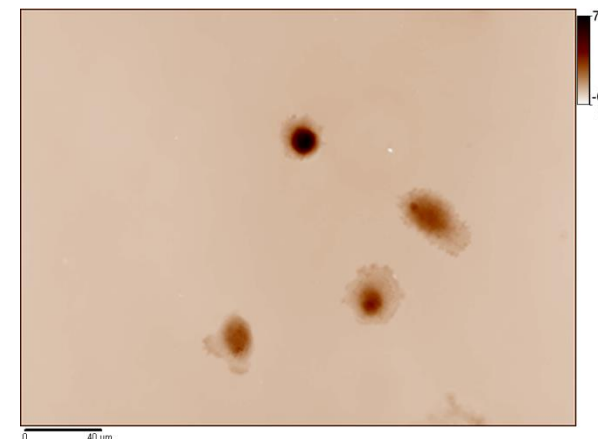
**COS-7 cells of 3 populations were analyzed:** control, starved in serum to slow their metabolism and treated with colcemid to block them in prometaphase

Hoechst 33342 labelling.  
40x 0.75 N.A. Scale bars : 20 µm



Population cellulaire : RPE, cellules épithéliales de rétines avec un vrai état G0 à confluence

Cells	Mitotic potential index ( $\mu\text{m}^3$ )	MPI (pg)
COS-7	93 - 128	517 - 711
HeLa	117 - 168	650 - 933
RPE	81 - 132	450 - 733



# Masse sèche vs chez les collègues

Avec le SID4Bio

Table 1. Dry mass measurement precision at different magnifications

Magnification	OPD noise, nm	FOV area, $\mu\text{m}^2$	Temporal error, %	Spatial error, %	Combined temporal and spatial error, %
10 $\times$	1.68 (0.21)	1,184*888	1.29 (0.51)	1.54 (0.57)	1.97 (0.86)
20 $\times$	1.29 (0.04)	592*444	1.05 (0.37)	1.21 (0.48)	1.71 (0.75)
40 $\times$	0.88 (0.16)	296*222	0.57 (0.23)	1.15 (0.46)	1.30 (0.70)

The measurement errors of each cell were quantified as the coefficient of variation (%) of its dry mass measurements. The table lists the mean of the errors quantified in more than 50 cells with the SD of the population in the brackets (see *Materials and Methods* for details). Note that the spatial displacement used in this study corresponds to the big displacement in Aknoun et al. (26).

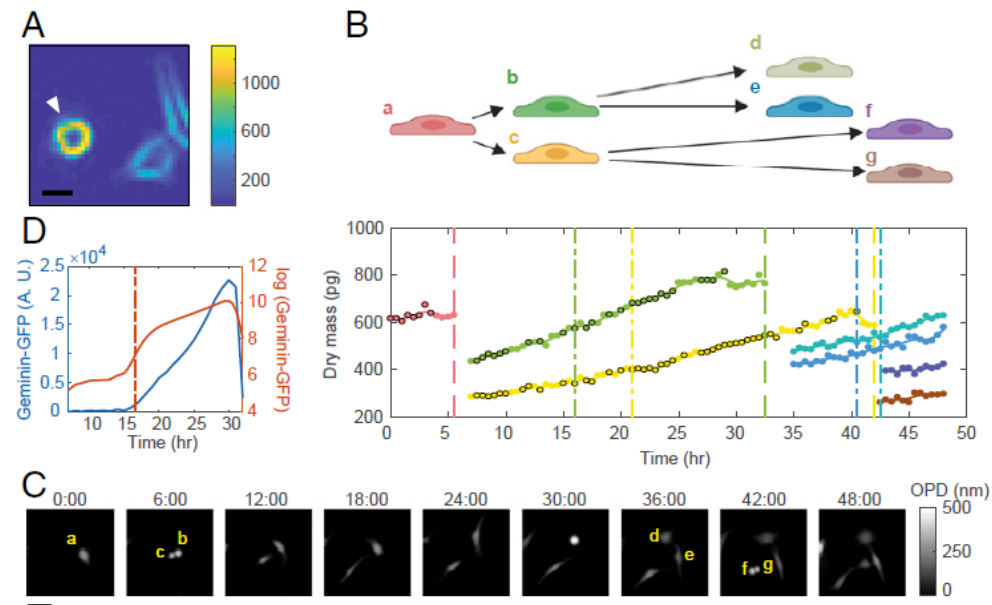
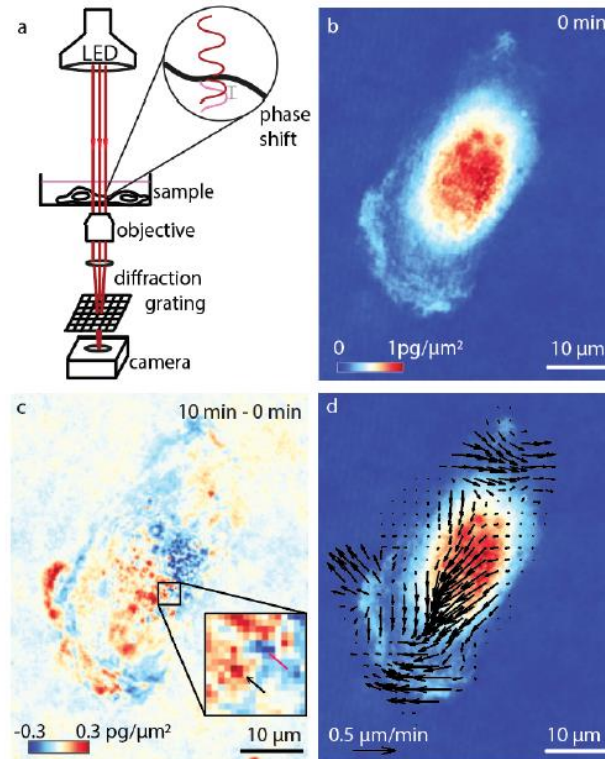


Fig. 3. Cell tracking. (A) The gradient magnitude of an OPD image measured at 10 $\times$ . (Scale bar, 20  $\mu\text{m}$ .) The arrow indicates a mitotic cell. (B) One cell is traced to its granddaughter cells. Each color represents a cell. Solid dots are the raw data of dry mass measurement. Dots with black edge indicate data points of cells not in contact with other cells or rounded; dots without black edge indicate data points removed during the filtering process. Solid lines are the spline line smoothing. Vertical dashed lines indicate the timing of cell divisions. Dashed-short dashed lines indicate the timing of G1/S transitions. (C) The OPD images of the representative cells in B at each sixth hour. (Scale bar, 50  $\mu\text{m}$ .) a–g indicate the corresponding cells in (B). (D) The intensity of Geminin-GFP measured in one cell (blue) and its logarithm (red). Dashed-short dashed line indicates the steepest slope of the log(Geminin-GFP) accumulation curve, which is defined as the time of the G1/S transition.



# Masse sèche chez les collègues

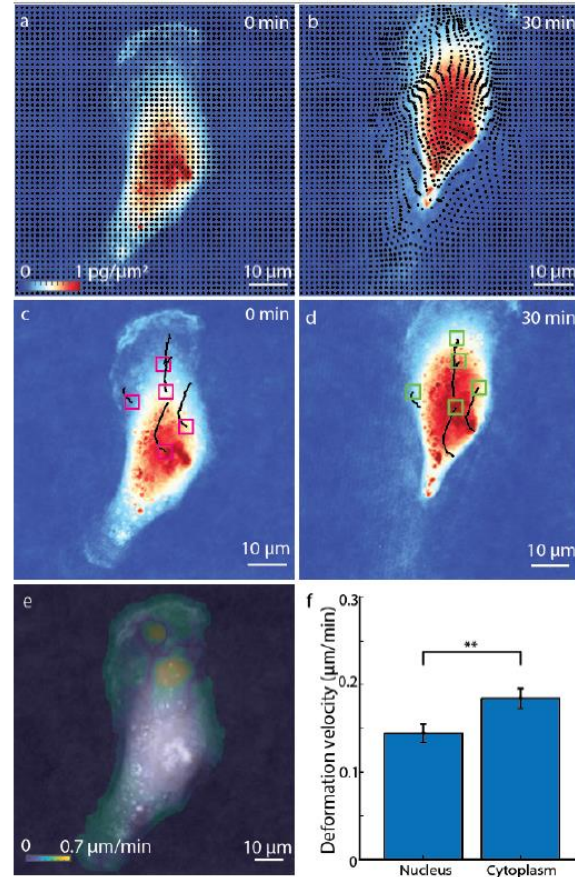
## Vélocimétrie avec le SID4Bio



**Figure 1. Quantitative phase velocimetry (QPV) measures intracellular dry mass movement.** (a) Quantitative phase imaging (QPI) measures the phase shift of light passing through a cell, which is used to compute the dry mass distribution in cells over time. (b) Dry mass distribution in RPE cell imaged at 120X magnification, at  $t = 0$  min. The scalebar indicates  $10 \mu\text{m}$  length. (c) The difference in QPI mass distribution of the RPE cell in (b) from an image taken at  $t = 10$  min later minus the image at 0 min reveals cell motion. The color scale shows the net displaced mass over this interval (red increase, blue decrease). The inset in (c) shows a  $15 \times 15$  pixel interrogation window that illustrates the change in position of an individual subcellular feature from the position marked with a red arrow to the position marked with a black arrow (d) The resulting intracellular biomass velocity field computed using quantitative phase velocimetry (QPV). Velocity magnitude indicated with a  $0.5 \mu\text{m}/\text{min}$  scalebar.

# Masse sèche chez les collègues

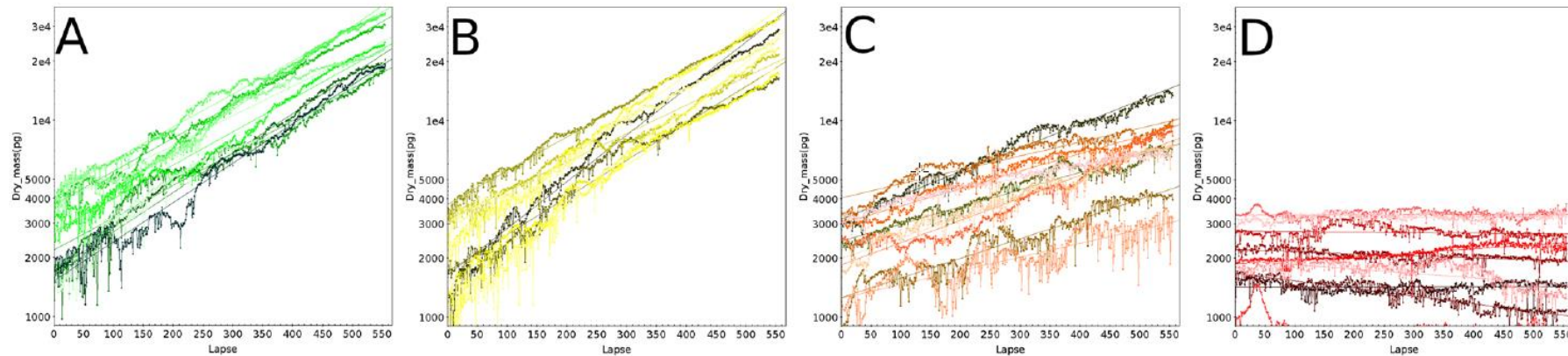
## Velocimétrie avec le SID4Bio



**Figure 4.** QPV shows spatial and temporal dynamics of biomass motion within cells. (a) Grid markers depict 4 by 4 pixel intracellular volume centroids overlaid on an RPE cell at 120 X magnification (b) which deforms from (a) to (b) due to movement of the cells in 30 minutes. (c) Dry mass inside control volumes initial positions marked using magenta boxes travel along the black line to reach the final positions indicated using green boxes in (d) in 30 minutes. (e) Deformation velocity, the whole cell velocity subtracted intracellular velocity distribution of dry mass, inside the RPE cell (f) Deformation velocity of dry mass in nucleus and cytoplasm of RPE cells, shows higher deformation in cytoplasm than nucleus ( $n = 59$ , error bars show standard error of the mean). \*\*  $p < 0.01$ .

# Influence de drogues

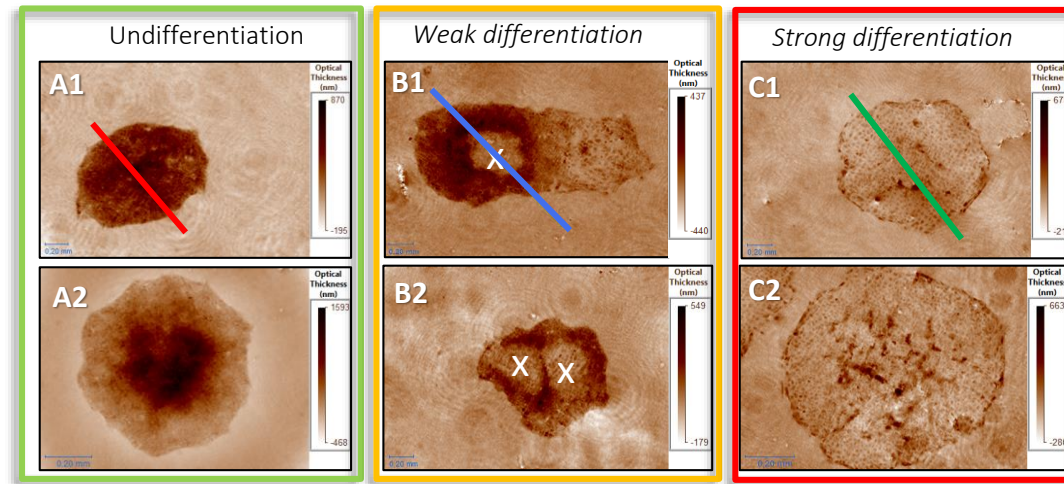
Staurosporine sur population de HEK (human embryonic kidney), 30 à 100 cellules par champ



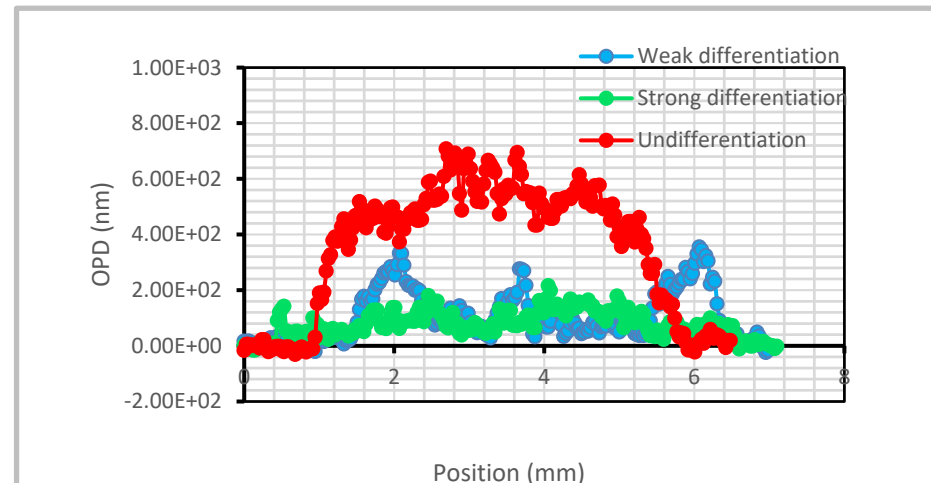
**Figure 3.** 92.5 h-live monitoring of HEK populations starting on day 1 after addition of increasing staurosporine (STS) concentrations. Each line on these plots corresponds to the monitoring of one field encompassing multiple cells together with its linear fit (same color), and each STS concentration is monitored on 9 fields. (A) 4 nM STS, (B) 20 nM STS, (C) 100 nM STS, (D) 500 nM STS.

# Différenciation de cellules souches

iPSC



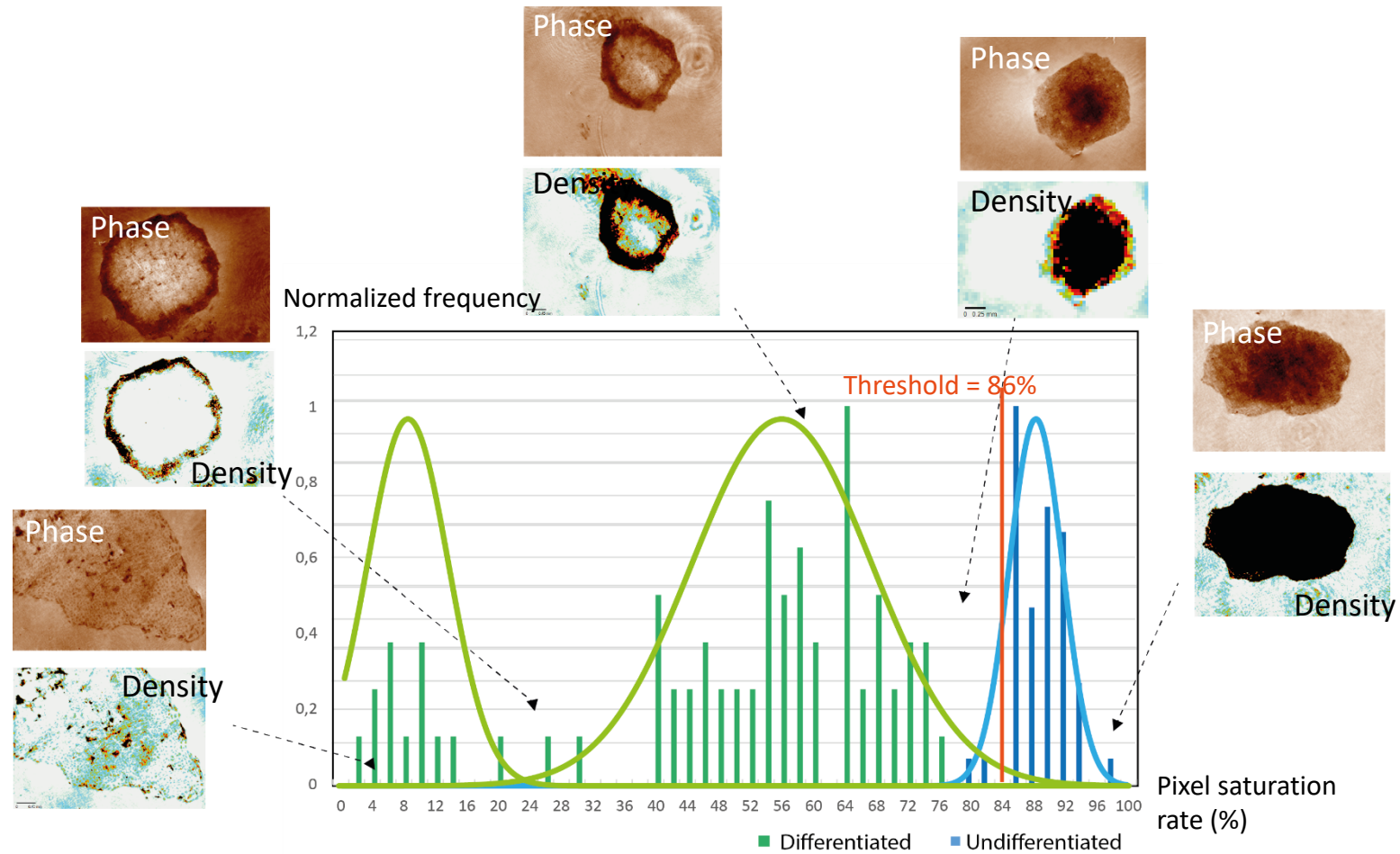
Phase images of hiPSC lines PFX#9. 2.5x imaging.



# Différenciation de cellules souches

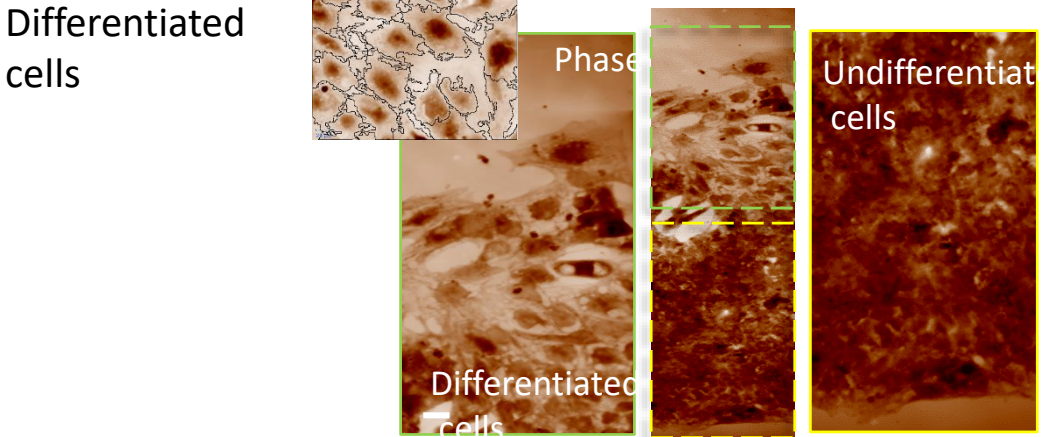
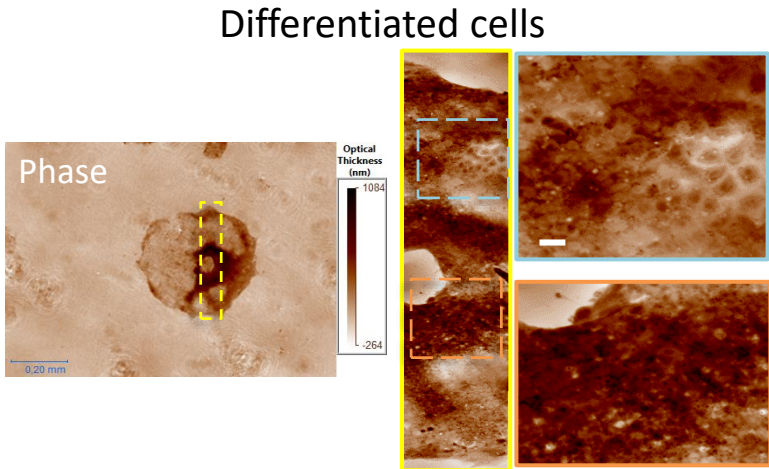
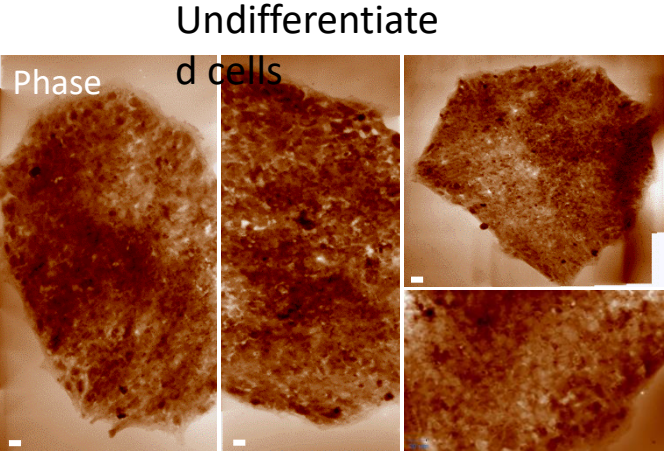
iPSC

Densité



# Différenciation de cellules souches

iPSC



# Conclusion

Moins de 1% d'erreur sur la masse sèche des cellules avec notre algorithme de segmentation, + extra-information

Pas d'influence du grossissement et de la cohérence spatiale de la lumière (dans des conditions classiques)

Influence de la mise au point (cellule en mitose notamment), qui peut être calibrée

Images sans artéfacts, sans bruit de speckle

Possibilité d'imagerie rapide (730 Hz) : blebbing...

# Perspectives

Histologie et couches de cellules superposées

Masse sèche de compartiments intracellulaires

Etude sur populations cellulaires dans un grand champ

Organismes « exotiques »



# Remerciements

**Institut Fresnel** : Serge Monneret

Pierre Bon (XLIM), Hervé Rigneault, Frédéric Galland

**Phasics** : Benoit Wattellier, Marie Begona Lebrun

Sherazade Aknoun, Anaïs Saintoyant, Lamiae Abdeladim

**DTBS-LSIV, CEA LETI** : Cédric Allier, Lionel Hervé, Ondrej Mandula, Pierre Blandin, Sophie Morales

**TIMC-IAMG, Univ. Grenoble** : Yves Usson

# Session 3: Biologie 1

*Chairman : Serge Monneret*

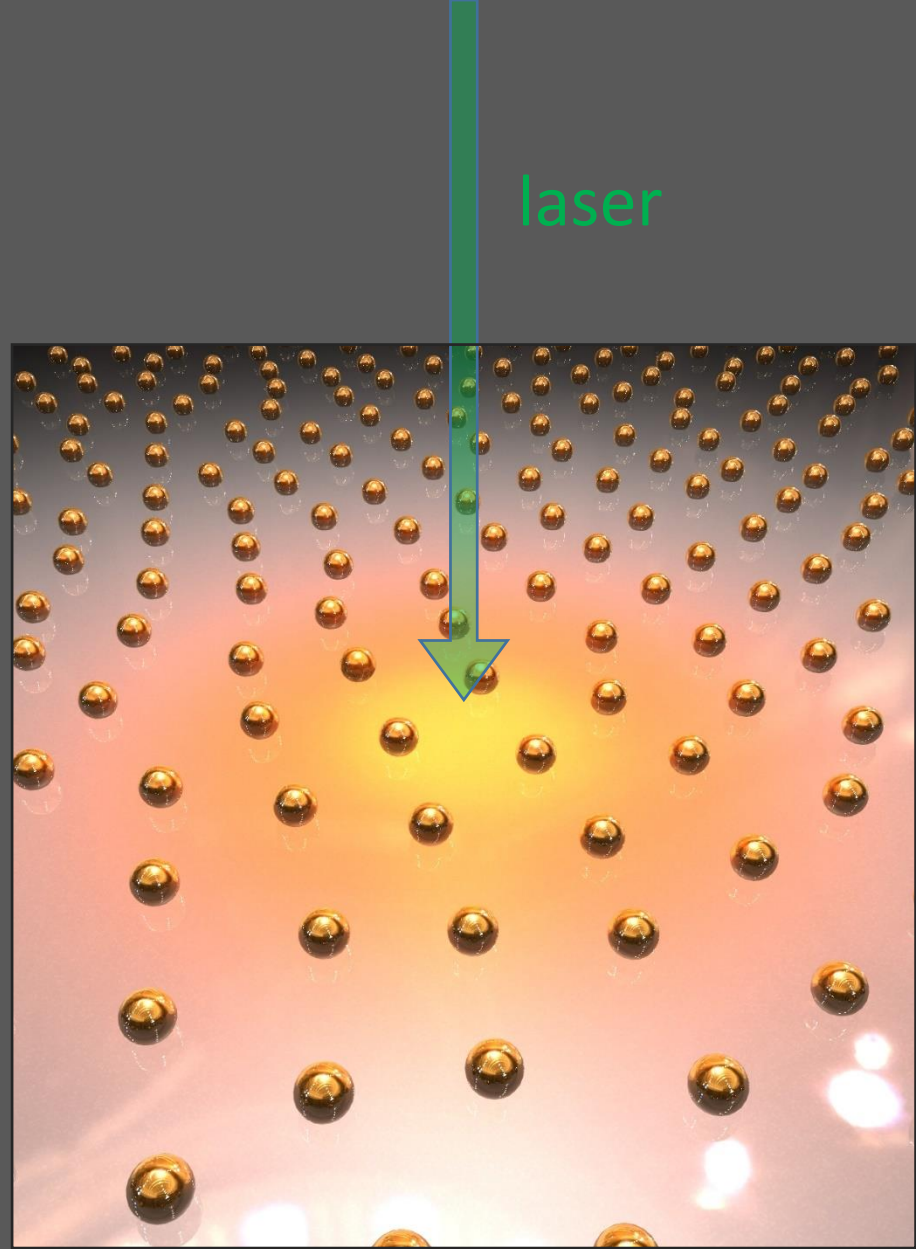
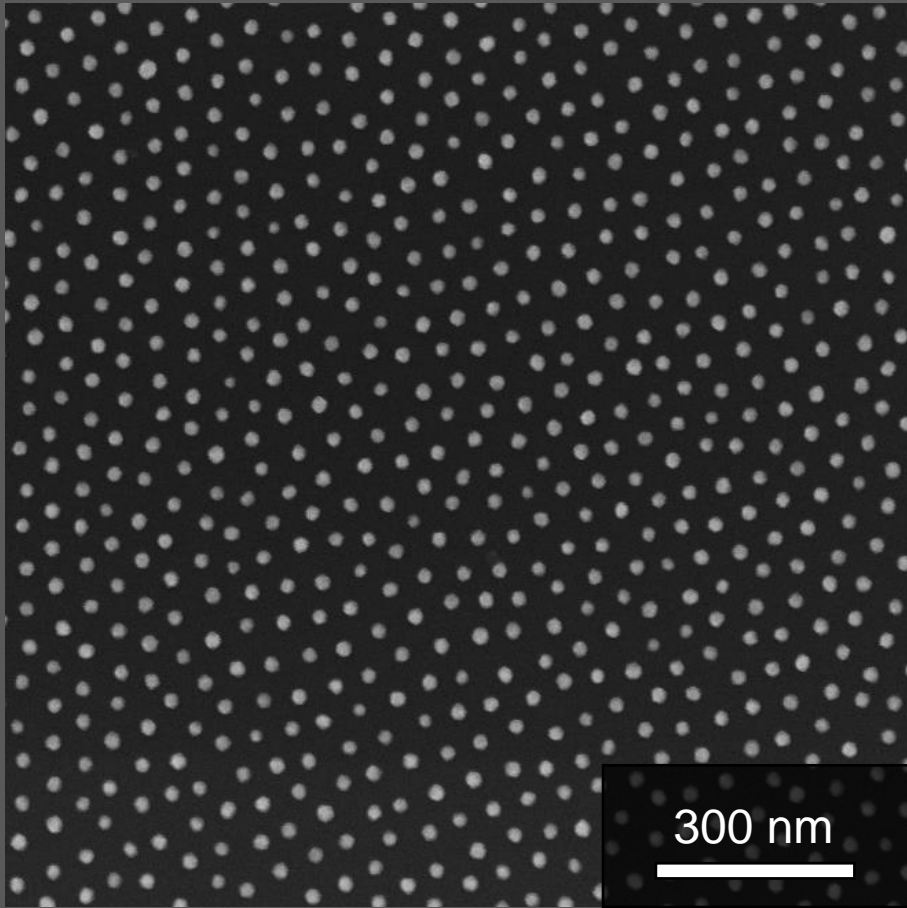
- *Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie optique. **Pierre Bon**, XLIM*
- *Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI. Principe, métrologie et applications. **Julien Savatier**, Institut Fresnel*
- *L'ID4L comme microscopie thermique. **Guillaume Baffou**, Institut Fresnel*

# La QLSI comme microscopie thermique

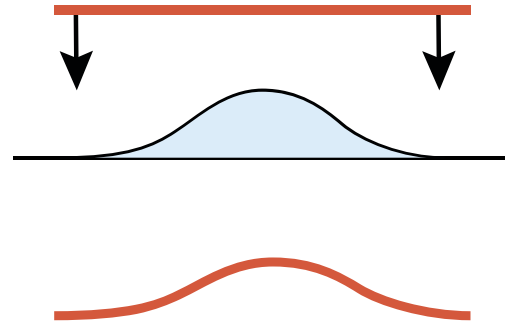
Guillaume Baffou

Institut Fresnel, CNRS, Aix Marseille University, Marseille (France)

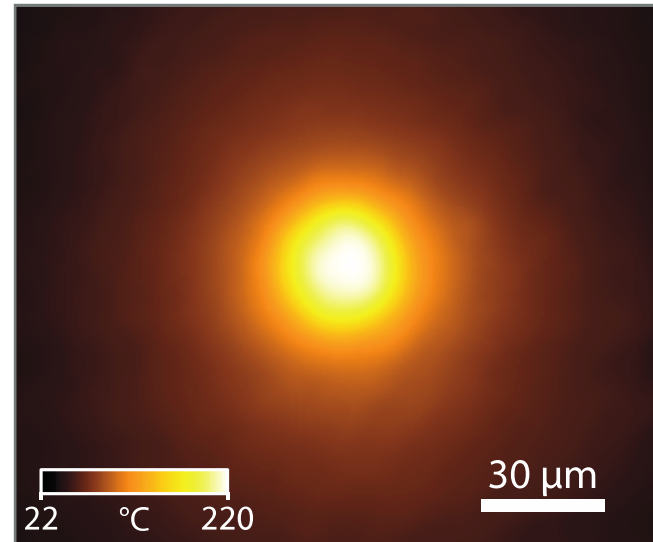
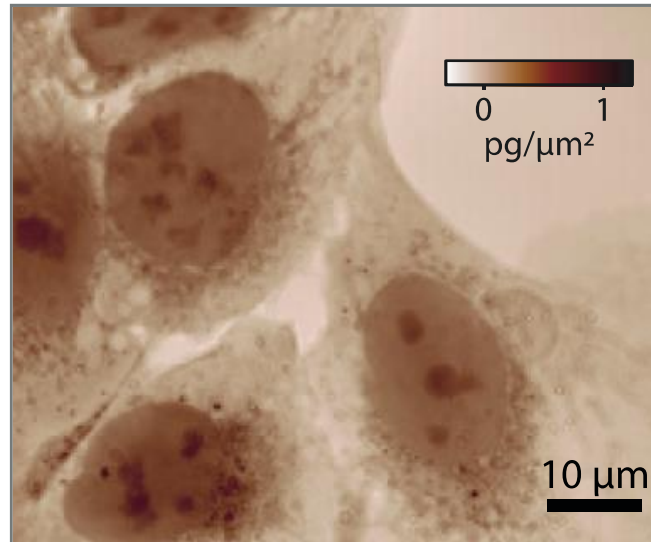
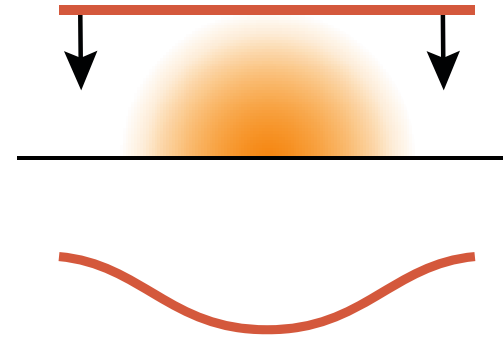


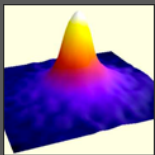


Bio cell



Temperature field





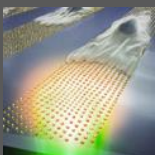
### T mapping

ACS Nano 6, 2452–2458 (2012)



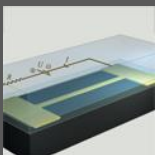
### Absorption cross section measurements

Physical Review B 86, 165417 (2012)



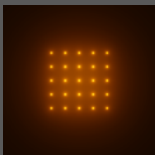
### Controlling cell migration

ACS Nano 6, 7227–7233 (2012)



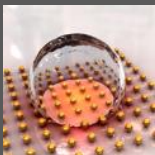
### 3D temperature mapping

Applied Physics Letters 102, 244103 (2013)



### Collective photothermal effects in plasmonics

ACS Nano 7, 6478–6488 (2013)



### Superheating and bubble formation

Journal Physical Chemistry C 118, 4890 (2014)



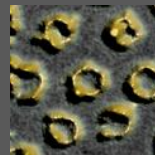
### Microscale T shaping

Nanoscale 6, 8984 - 8989 (2014)



### Nanowire heating

ACS Nano 9, 5551-5558 (2015)



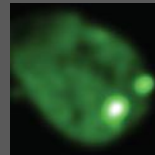
### Block copolymer micellar lithography

Nanoscale 7, 15814-15821 (2015)



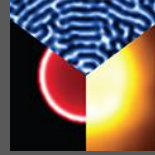
### Hydrothermal nanochemistry

ACS Omega 1, 2-8 (2016)



### Heat shock protein expression control

Small 14, 1801910 (2018)



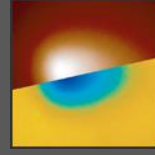
### Microscale T shaping

Scientific Report 9, 4644 (2019)



### Metal layer and nanohole heating

ACS Photonics 6, 1763-1773 (2019)



### Microscale thermophoresis in liquids

J Phys Chem C 125, 21533-21542 (2021)



### Life at high temperature

Nature Communications 13, 5342 (2022)

Let us consider a uniform medium of thermal conductivity  $\kappa$ . The heat diffusion equation in the steady state reads:

$$-\kappa\Delta T(\mathbf{r}) = q(\mathbf{r})$$

The temperature profile from a point-like source of heat is solution of the equation:

$$-\kappa\Delta T_0(\mathbf{r}) = Q_0\delta(\mathbf{r})$$

and reads

$$T_0(\mathbf{r}) = \frac{Q_0}{4\pi\kappa|\mathbf{r}|} \quad (3)$$

This solution can be recast into

$$T_0(\mathbf{r}) = Q_0\mathcal{G}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

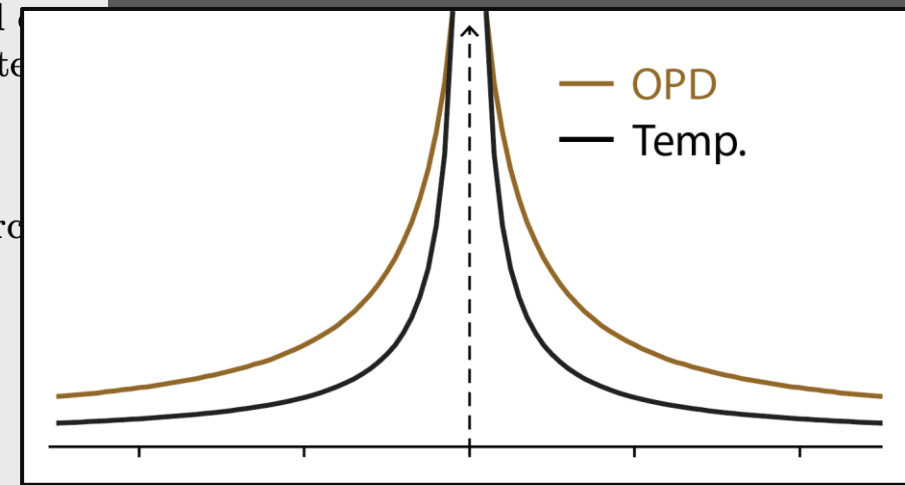
where  $\mathcal{G}(\mathbf{r})$  is the Green's function of the problem:

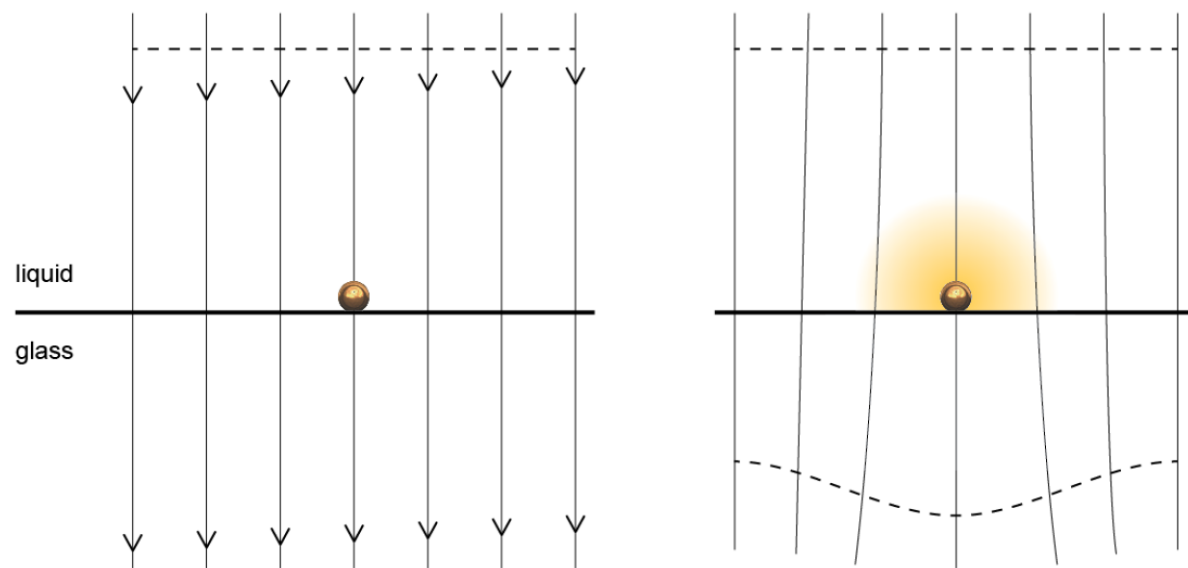
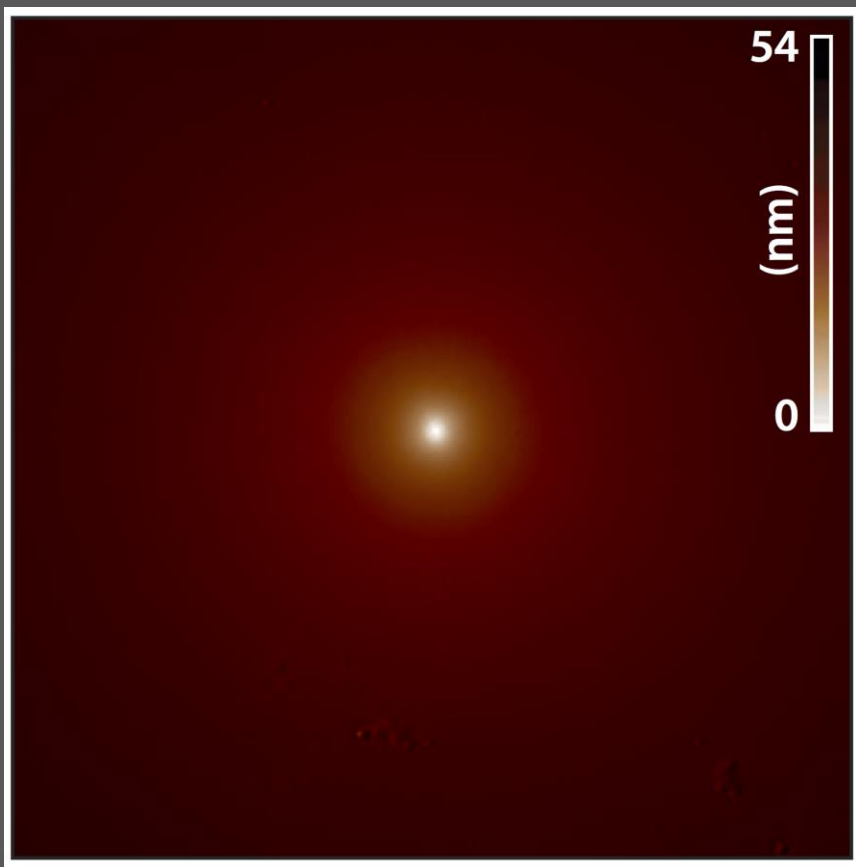
$$\mathcal{G}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\kappa|\mathbf{r}|} \quad (5)$$

When the source is not a point, but is described by a distribution  $q(\mathbf{r})$ , the temperature distribution reads:

$$T(\mathbf{r}) = \iiint \mathcal{G}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')q(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' \quad (6)$$

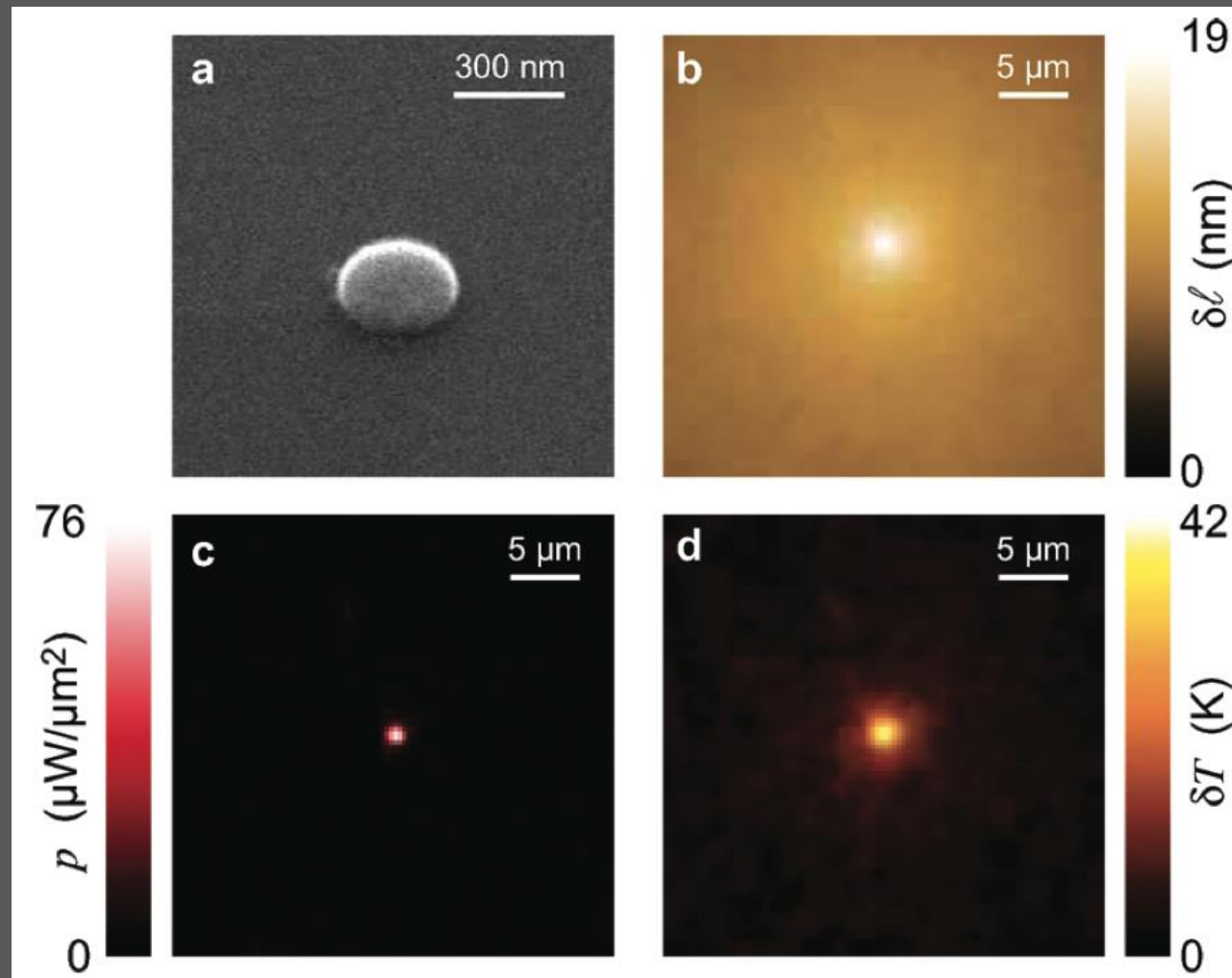
$$T(\mathbf{r}) = \mathcal{G} \otimes q(\mathbf{r}) \quad (7)$$



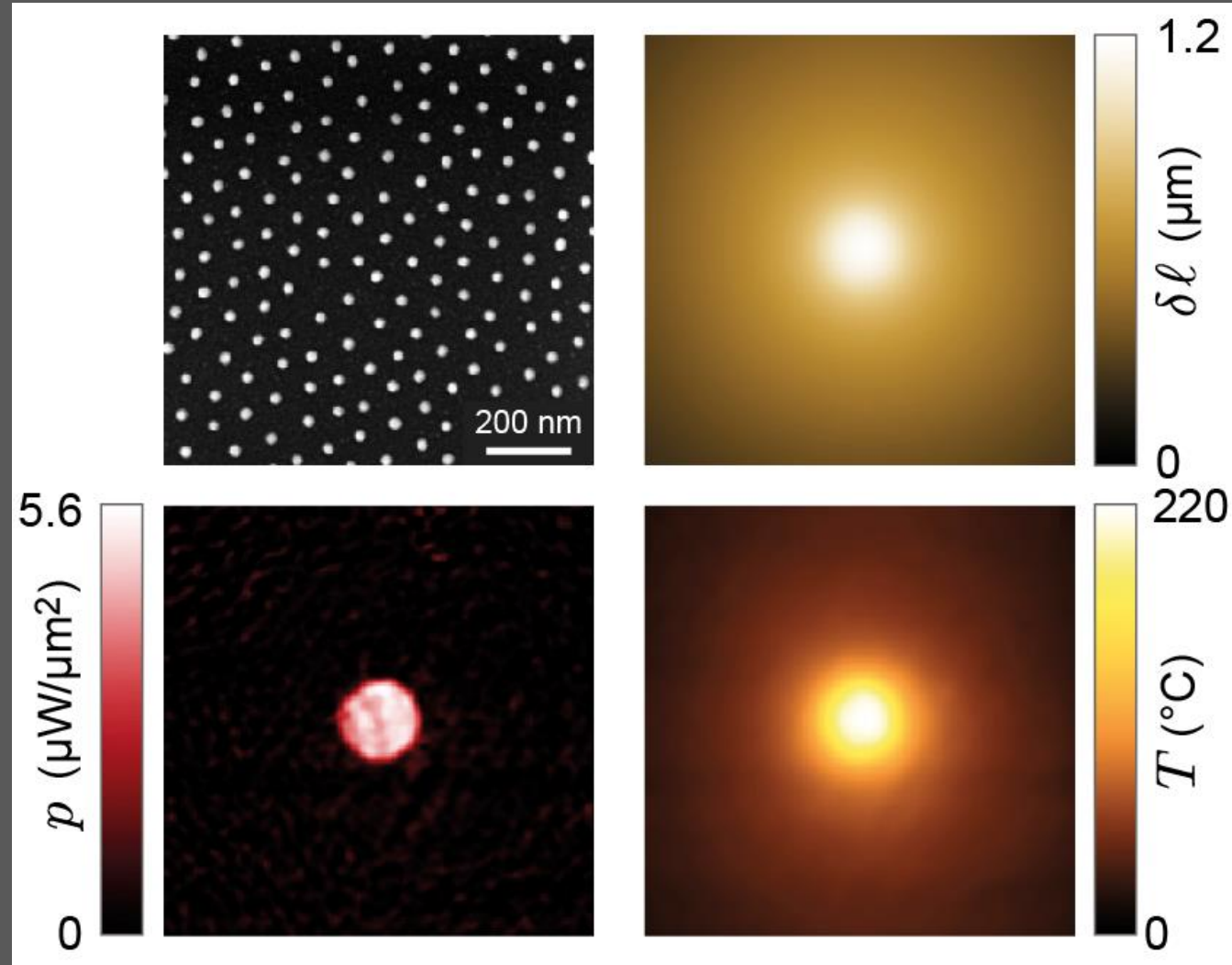




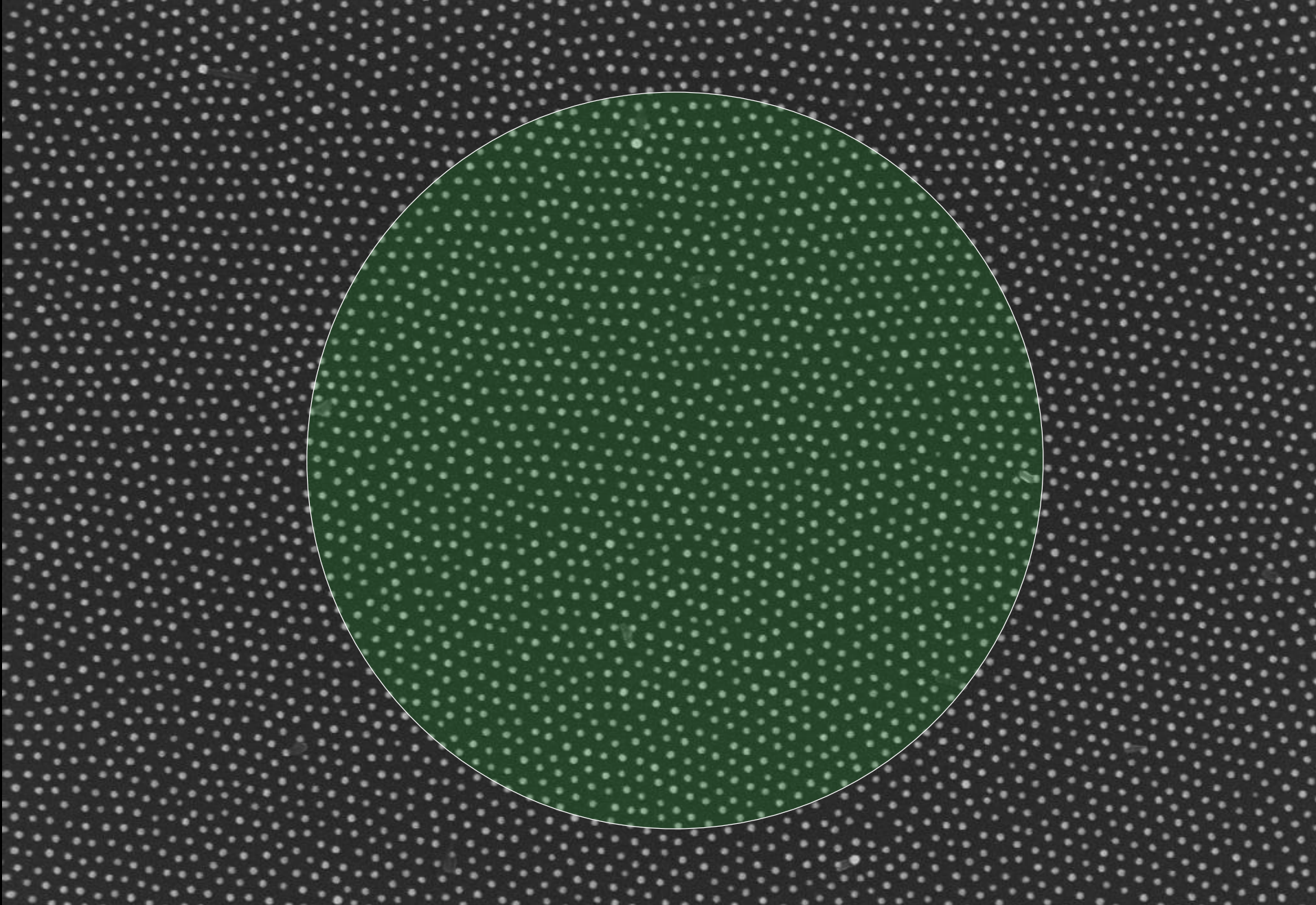
# QLSI for temperature microscopy



# QLSI for temperature microscopy







200 nm



Mag = 50.07 K X

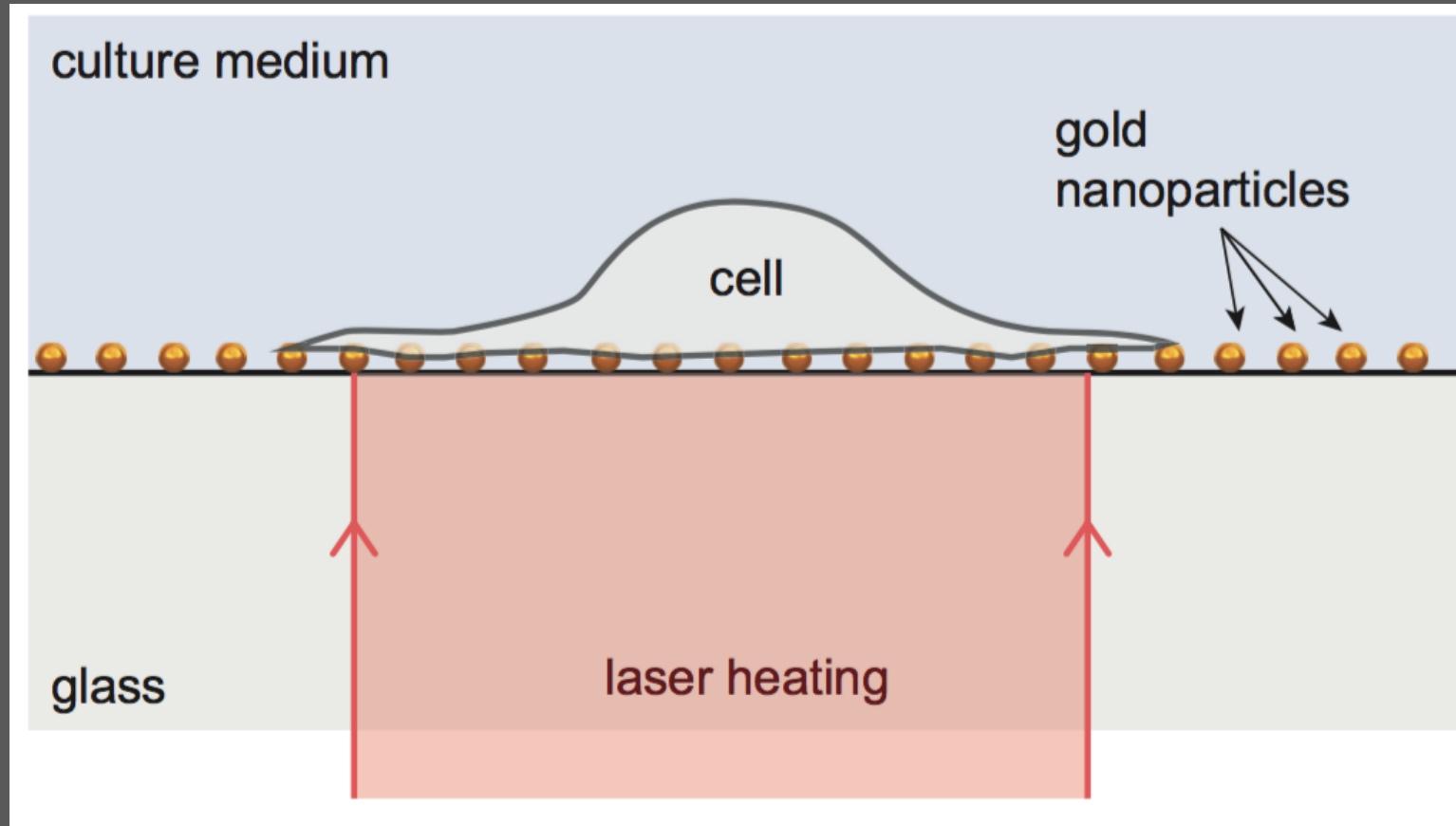
EHT = 5.00 kV

WD = 5.2 mm

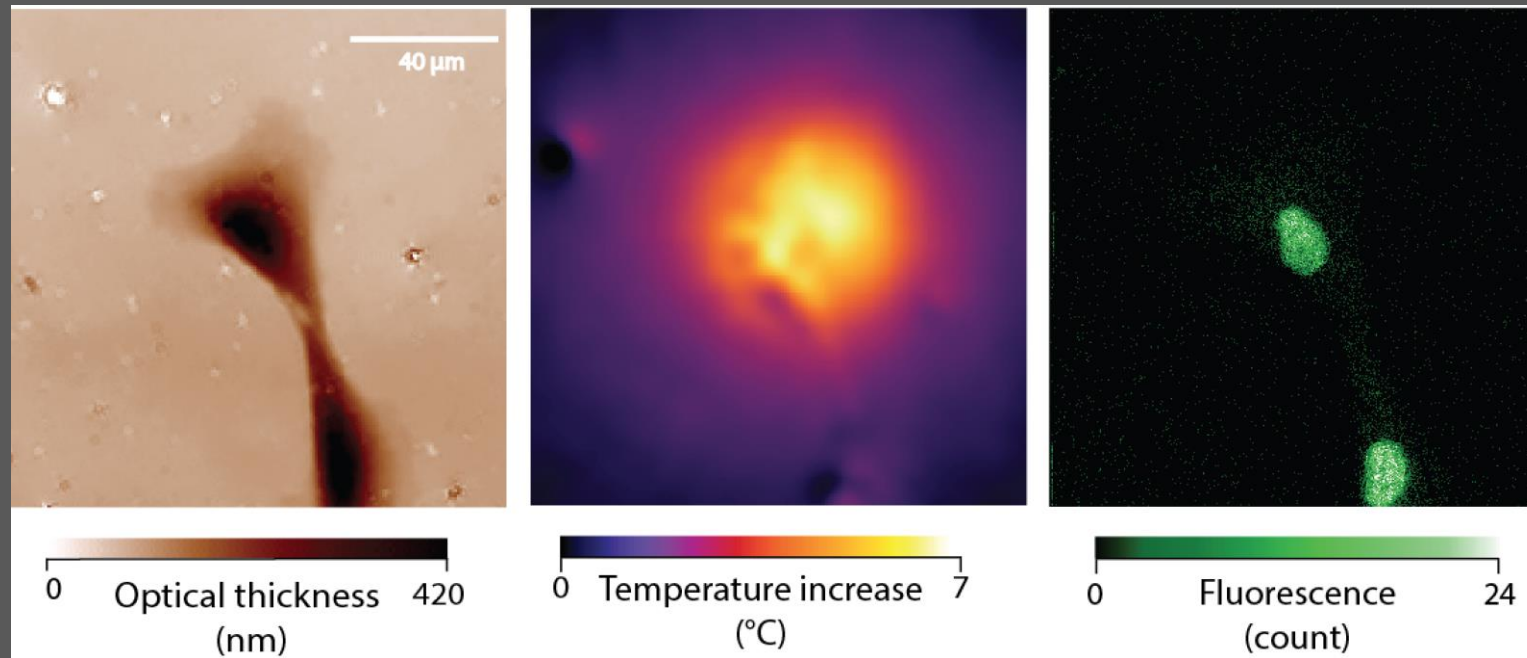
Signal A = InLens

Date :12 Jun 2013

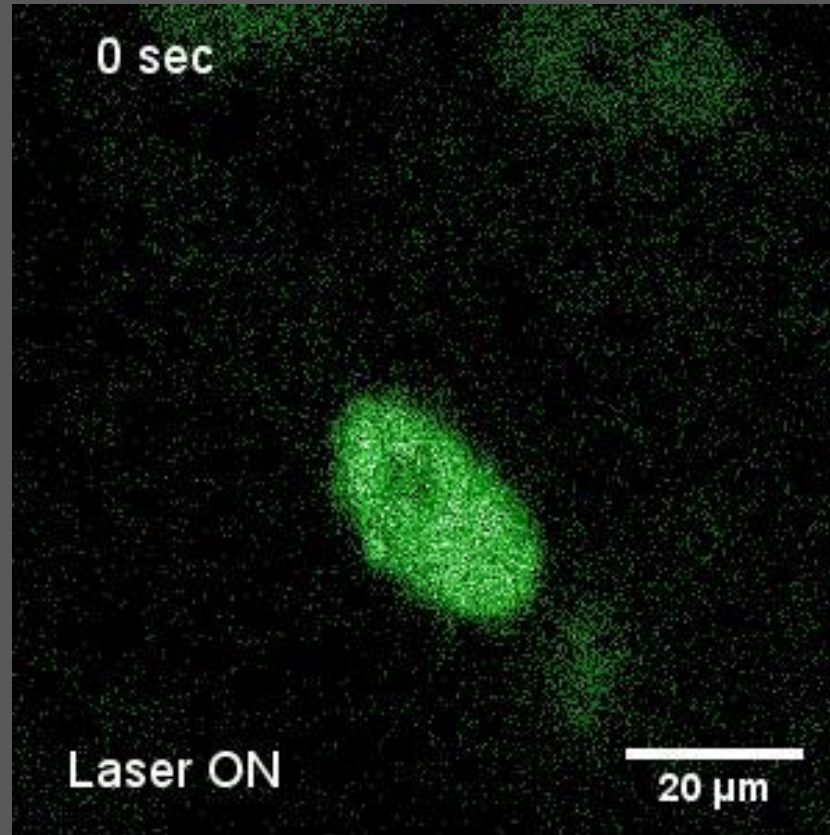
# Gold nanoparticle laser-heating of living cells



# Gold nanoparticle laser-heating of living cells



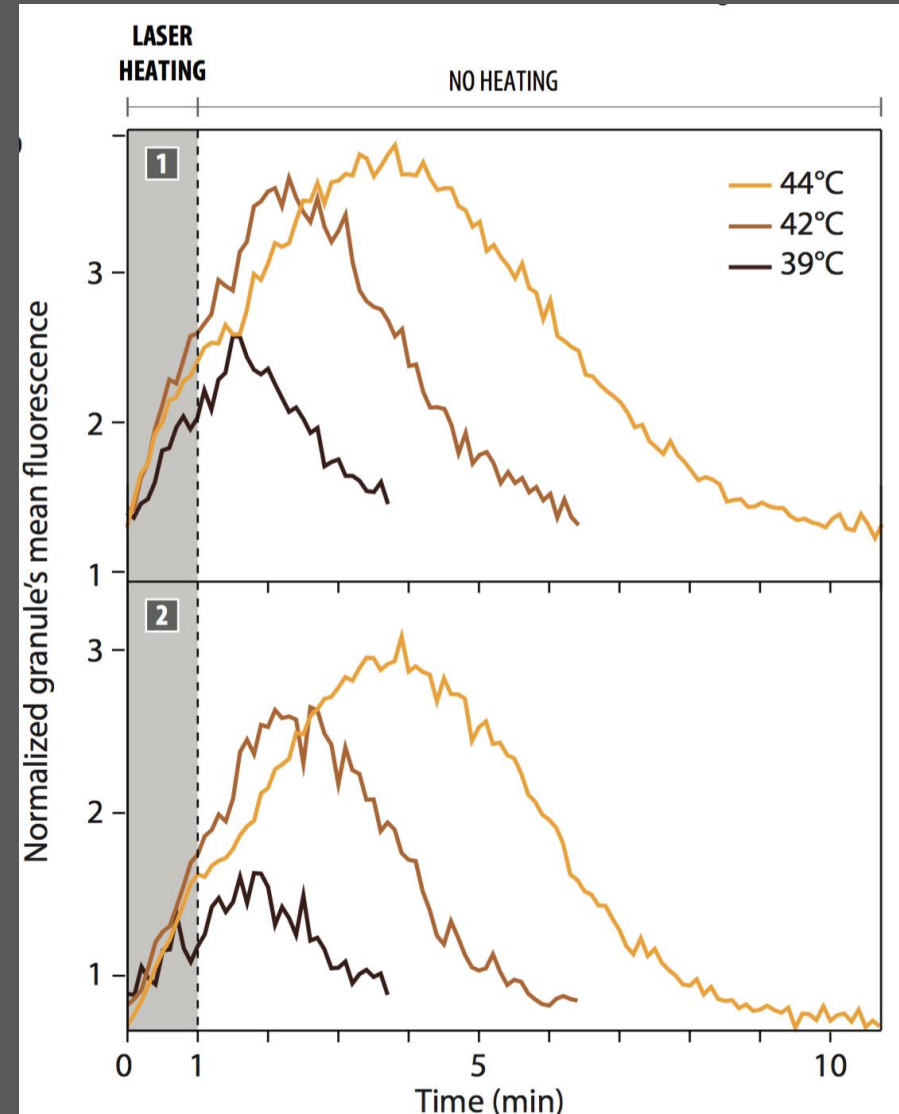
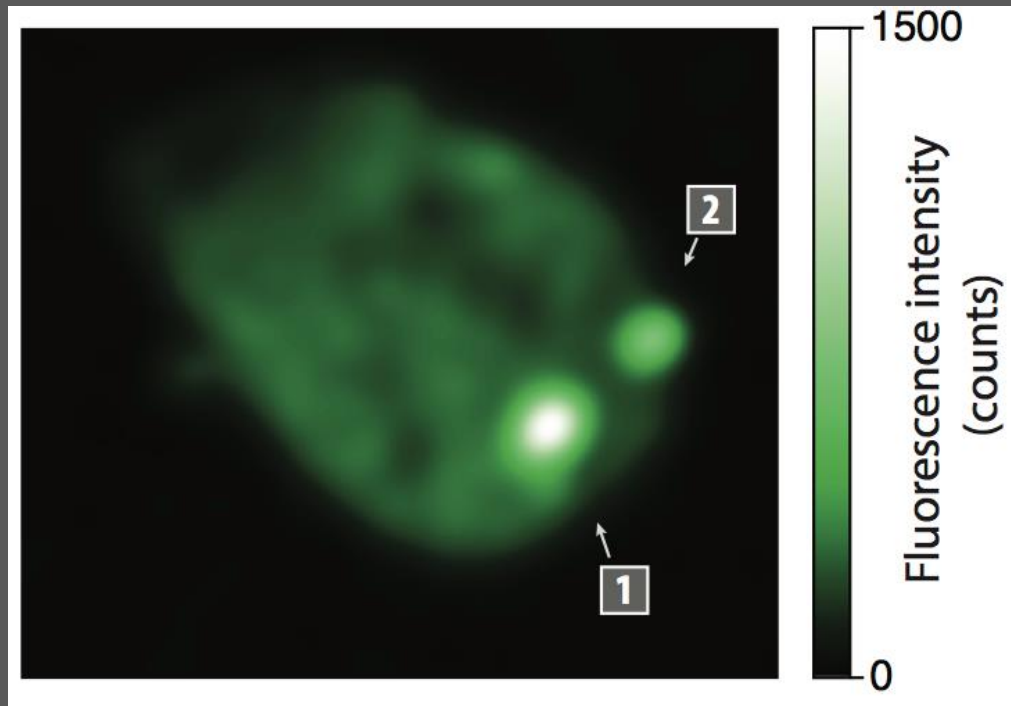
# Gold nanoparticle laser-heating of living cells





# Gold nanoparticle laser-heating of living cells

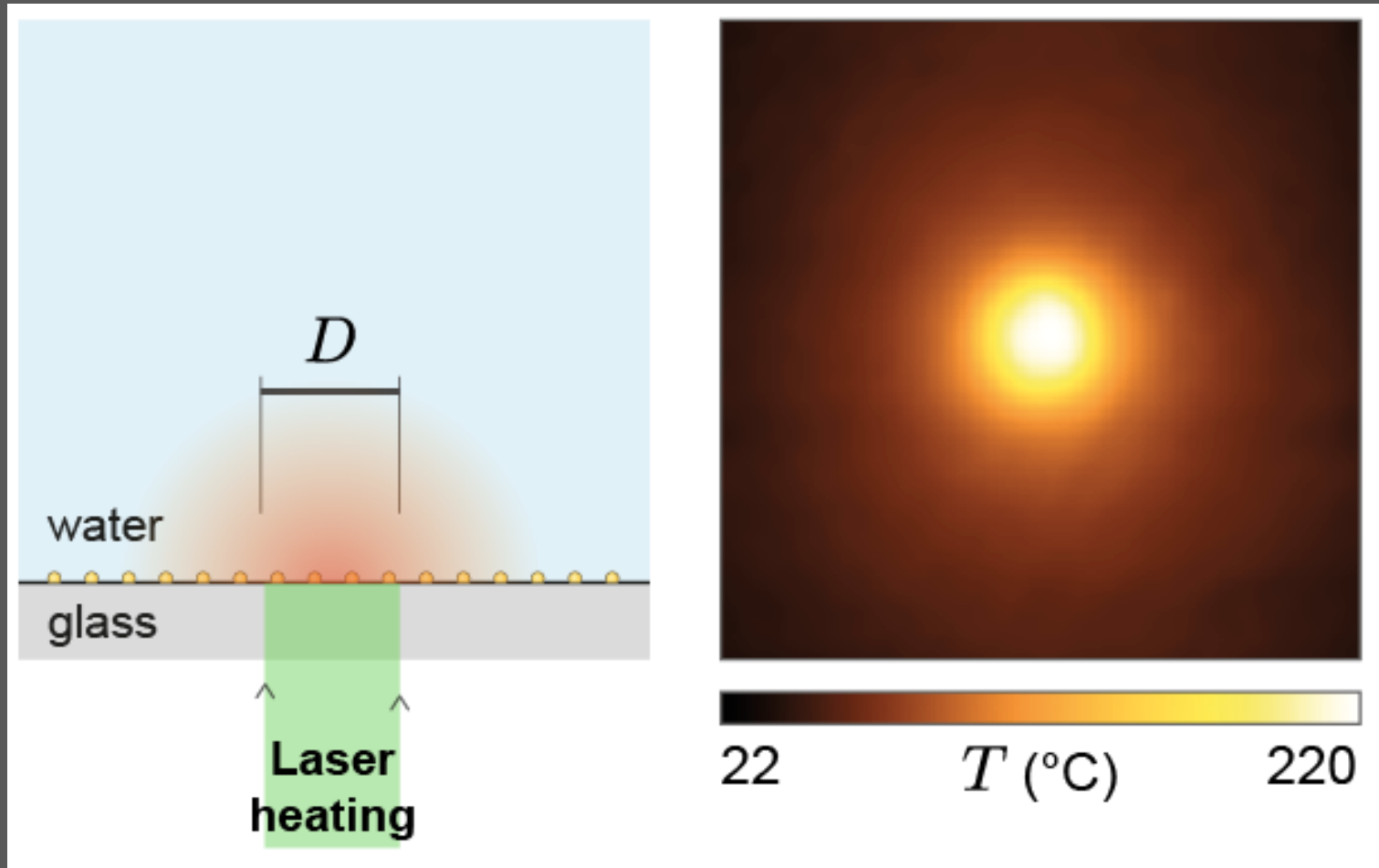
Hadrien Robert  
Thesis 2015-  
2018



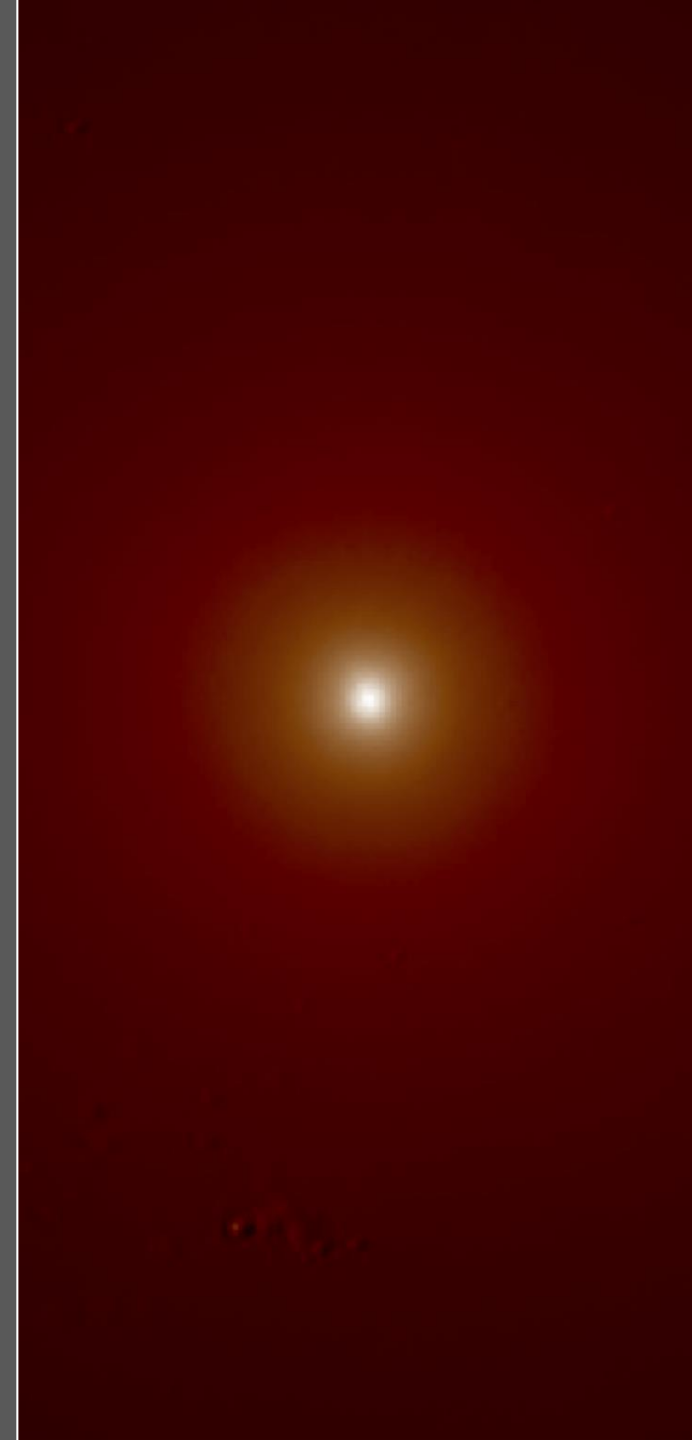




# QLSI for temperature microscopy



# QLSI microscopy for the study of thermophiles



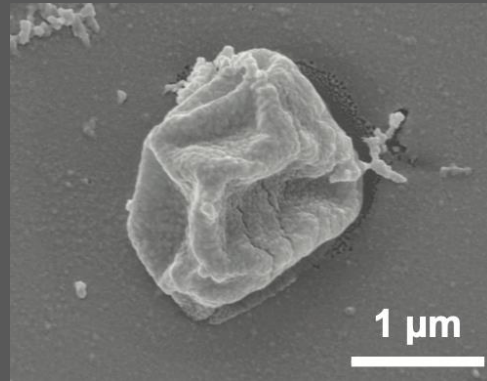
# Micro-organismes hyperthermophiles

Projet ERC HiPhore – 2018 - 2023

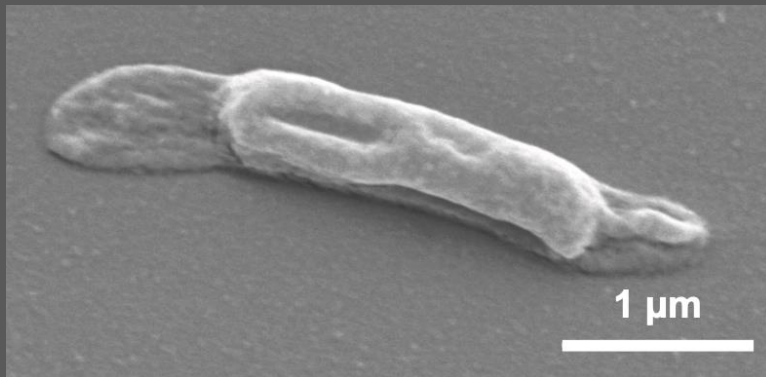
*Pyrococcus* (103°C)



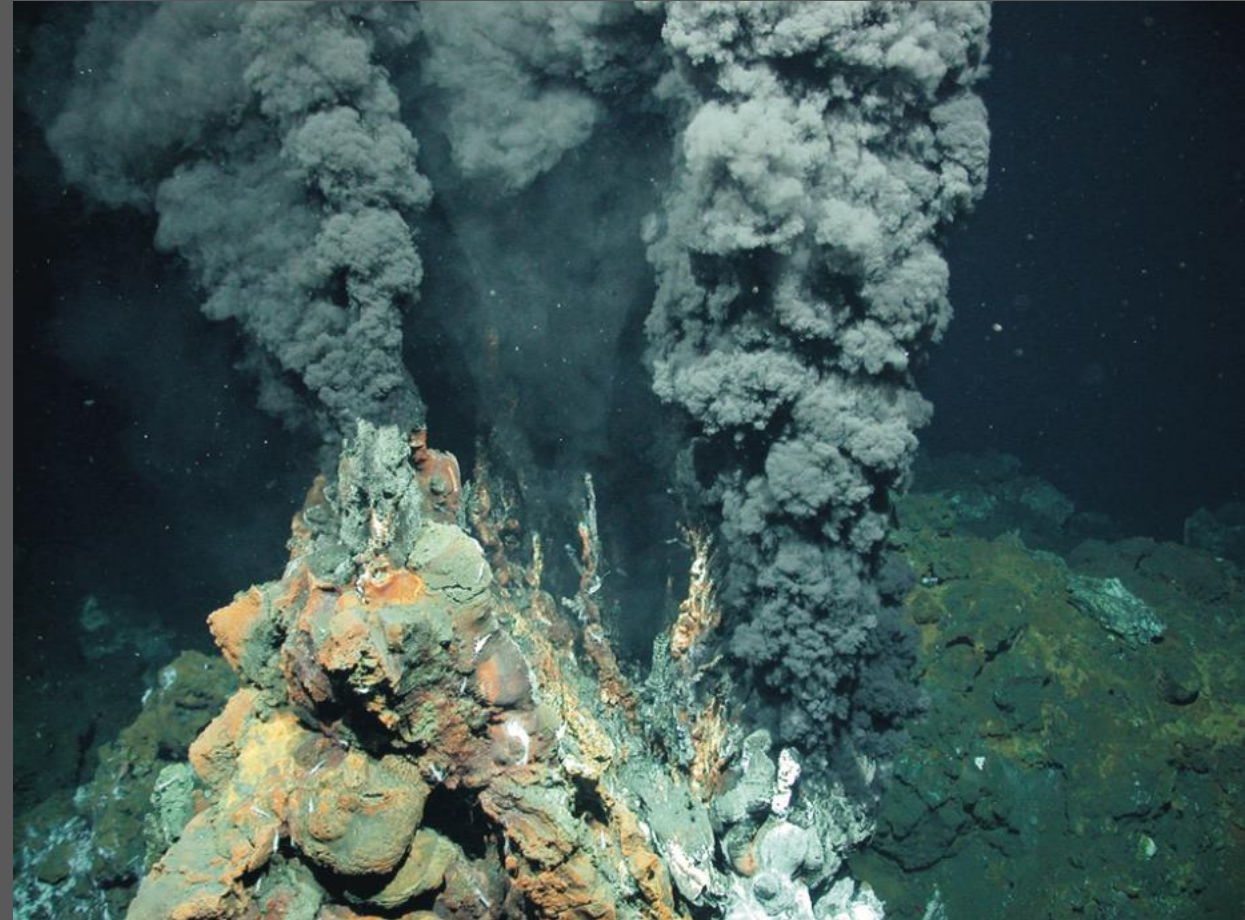
*Pyrolobus fumarii* (113°C)



*Thermotoga* (90°C)



Patrick  
Forterre





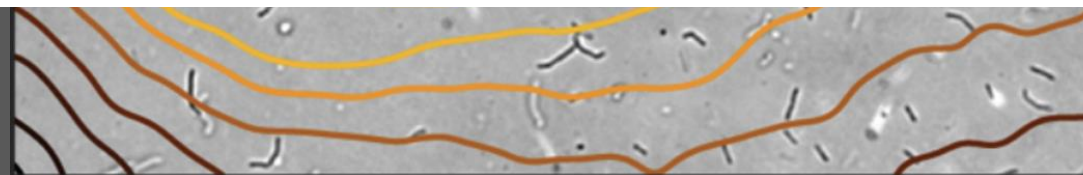
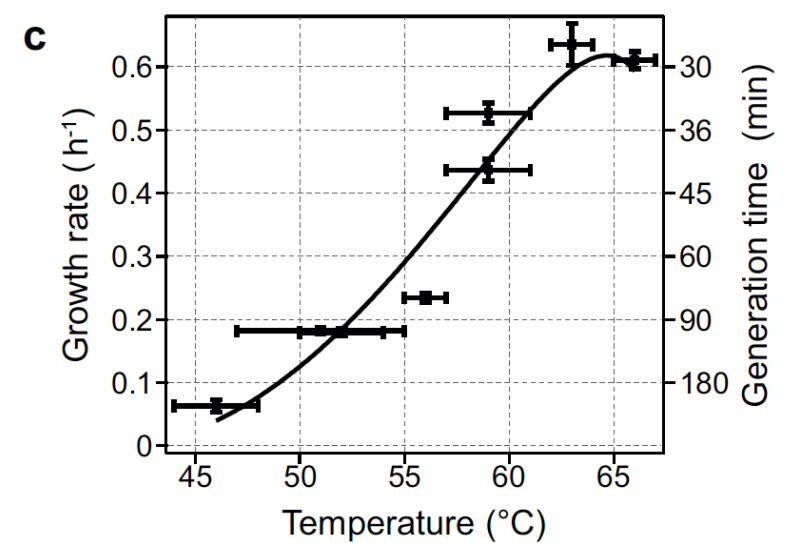
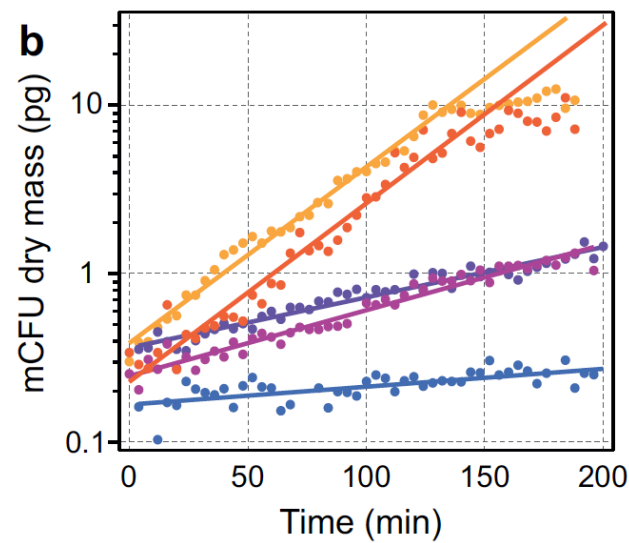
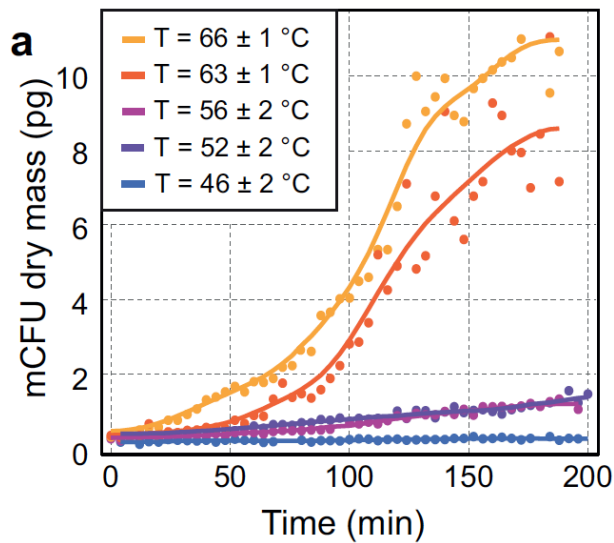
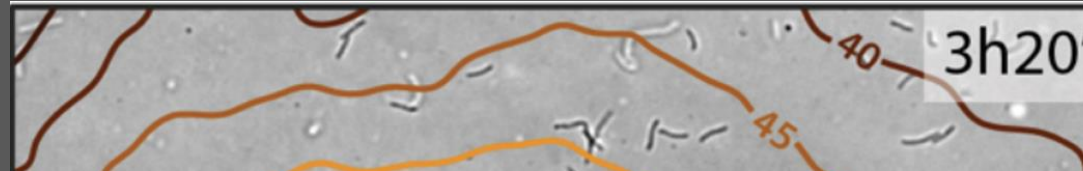
Maëlle Bénéfice  
Ph.D. 2020-2023



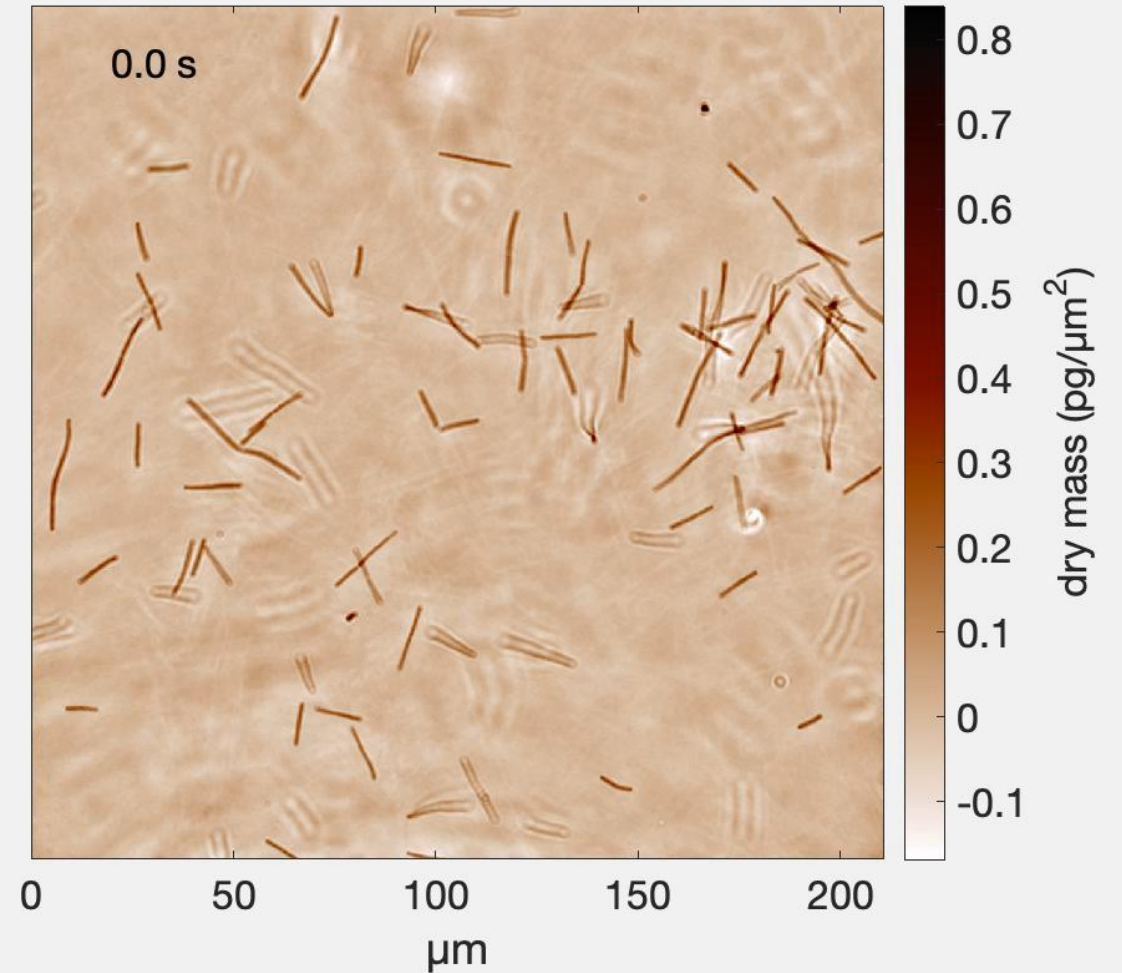
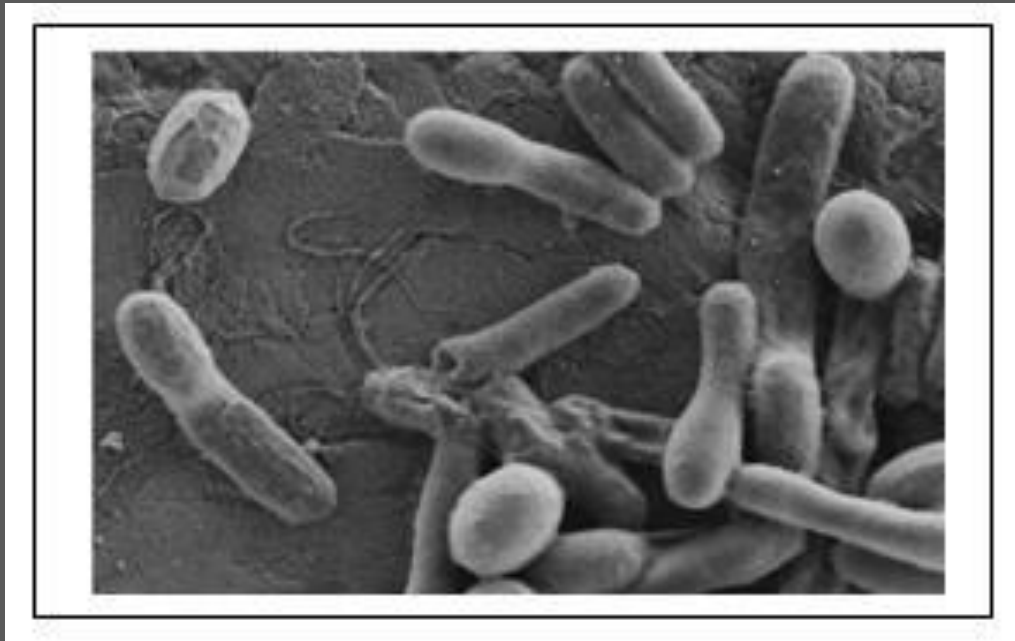
Céline Molinaro  
Postdoc 2019-2020

# QLSI microscopy For dry mass measurements

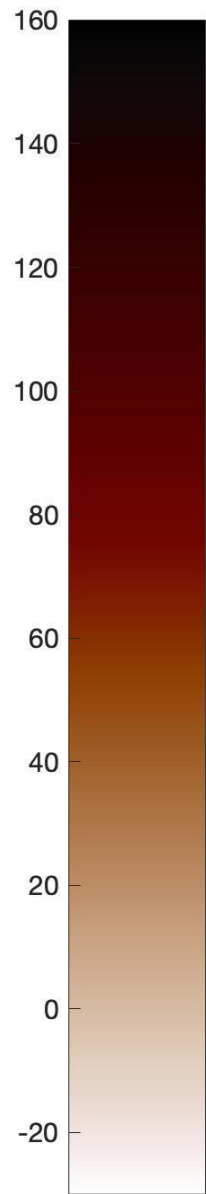
*Geobacillus stearothermophilus* (60°C)



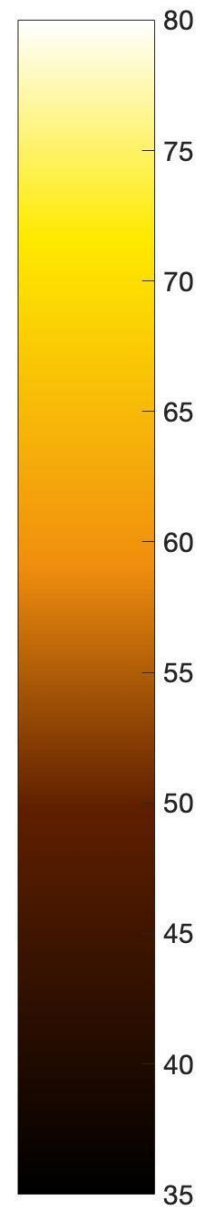
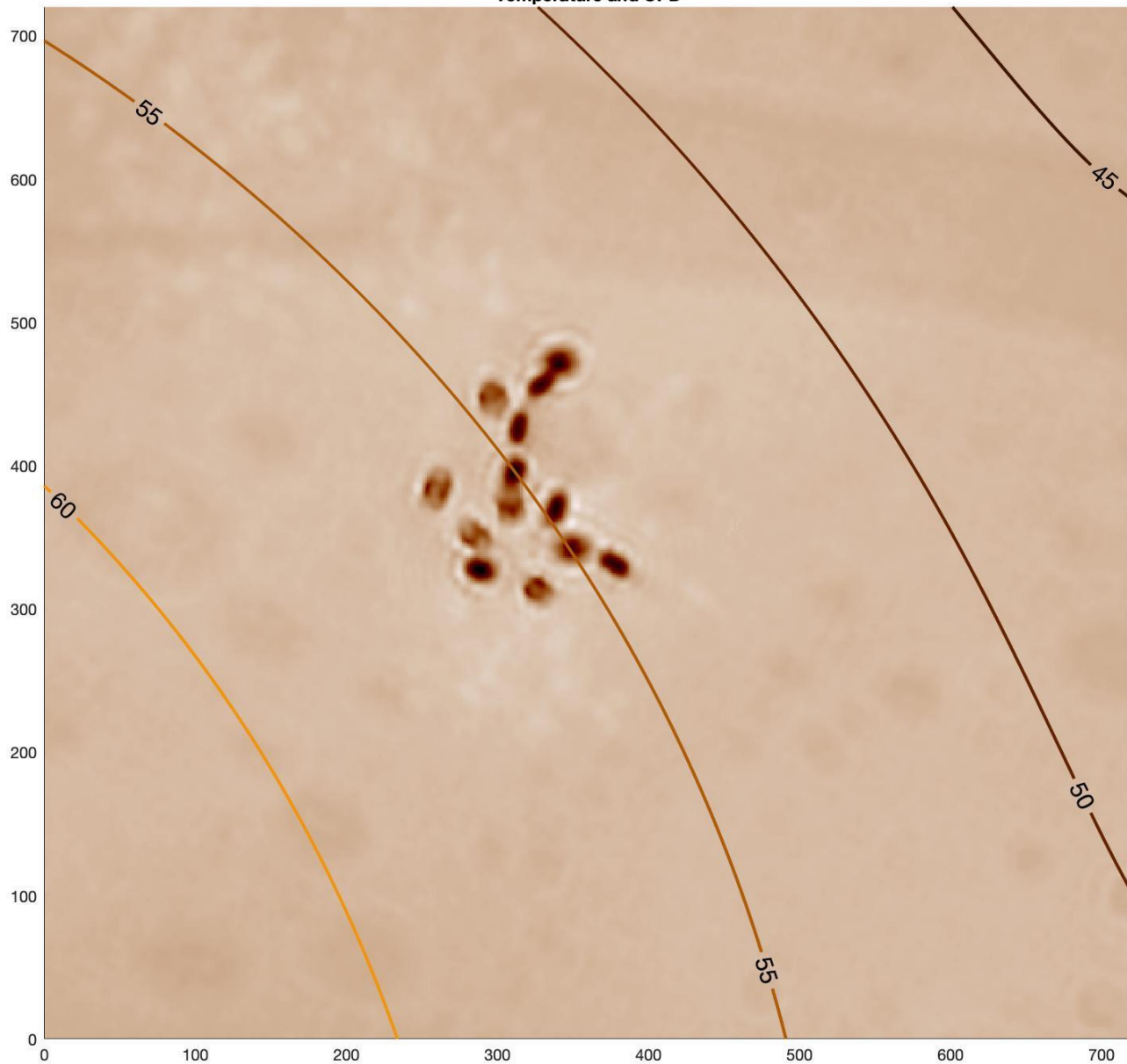
# Thermophilic micro-organisms



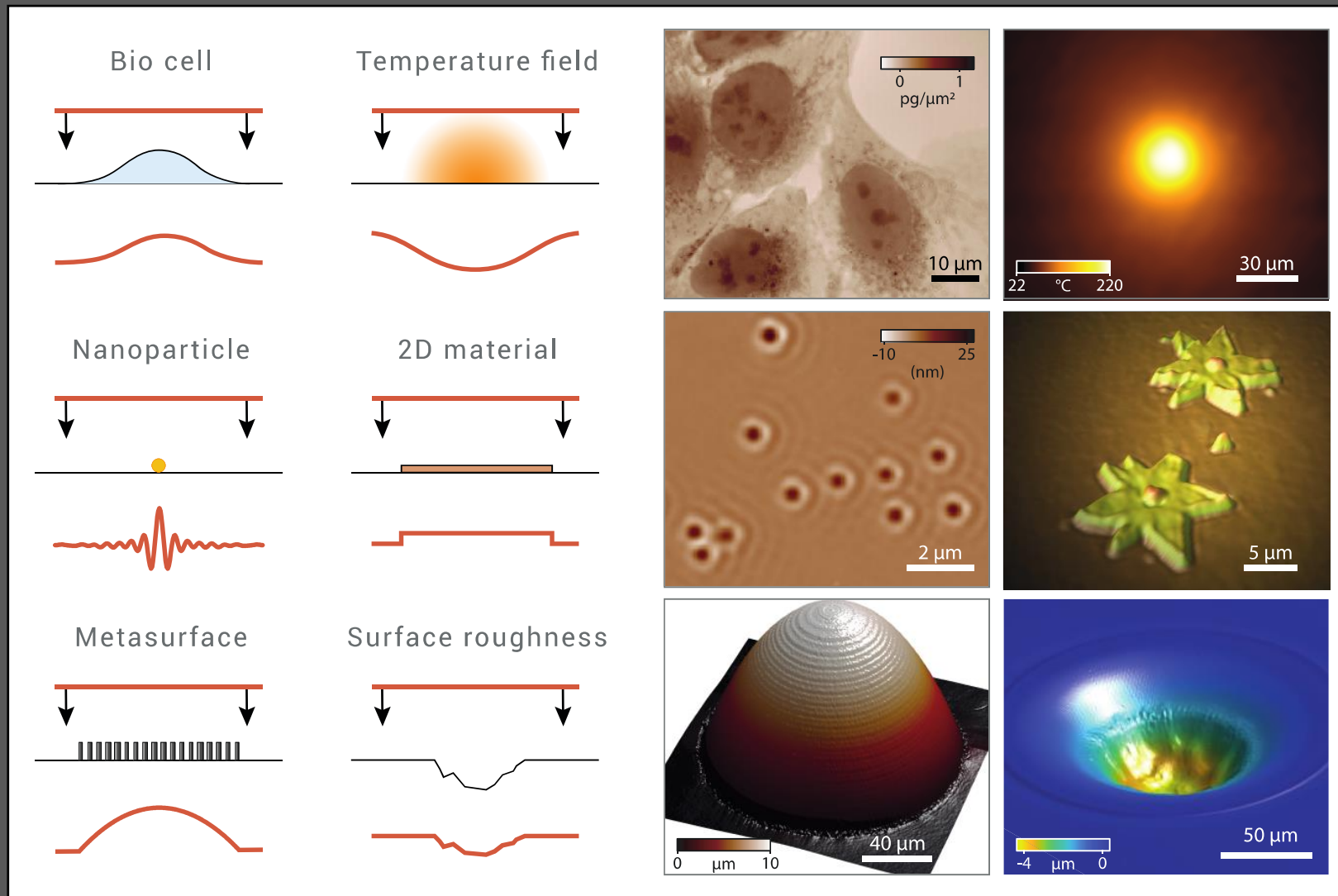
OPD [nm]



Temperature and OPD



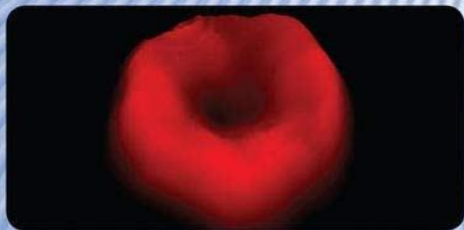
# Conclusion





McGraw-Hill | BIOPHOTONICS

# Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues



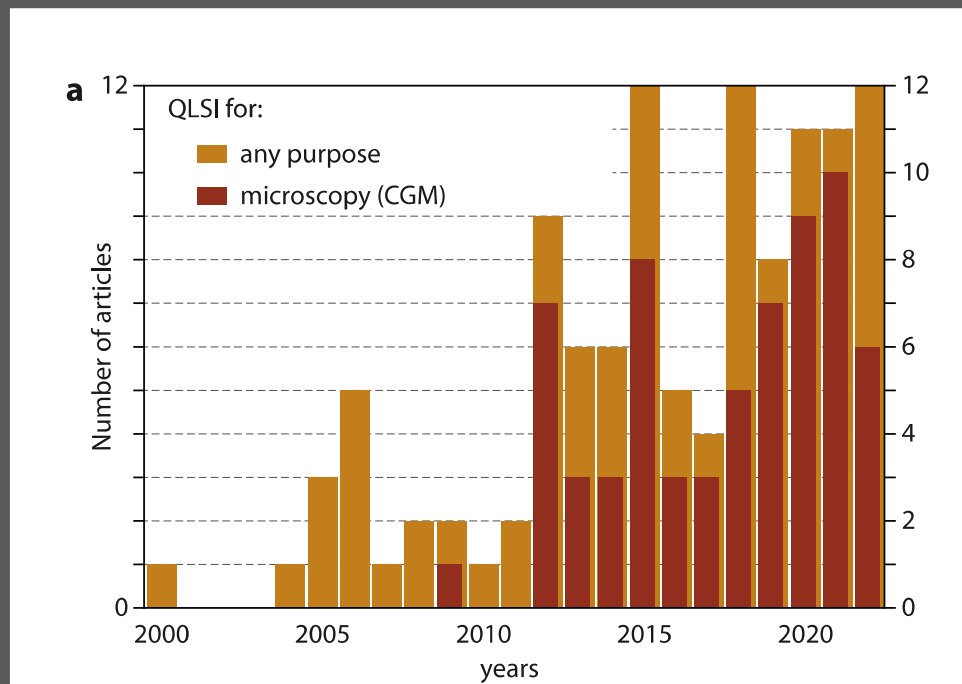
Gabriel Popescu

SPIE.

# PHOTONICS WEST

23 January - 2 February 2023  
San Francisco, California

#PhotonicsWest



# Acknowledgments

## QLSI pour la microscopie thermique



Maëlle Bénéfice  
Hadrien Robert  
Ljiljana Durdevic  
Sadman Shakib  
Baptiste Marthy  
Pascal Berto  
Benoit Rogez  
Hervé Rigneault  
Serge Monneret  
Julien Savatier  
Pierre Bon



Patrick Forterre  
*I2BC, Gif sur Yvette, France*



Julien Polleux  
*fh gesundheit, Innsbrück, Austria*



Alois Würger  
*LOMA, Bordeaux, France*

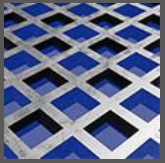


Romain Quidant  
*ETH Zürich, Suisse*



European Research Council  
Established by the European Commission



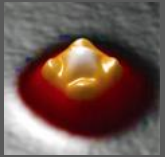


*Quantitative phase microscopy using quadriwave lateral shearing interferometry (QLSI): principle, terminology, algorithm and grating shadow description.*

G. Baffou

J. Phys. D: Appl. Phys. 54, 294002 (2021)

<https://github.com/baffou/CGMprocess>



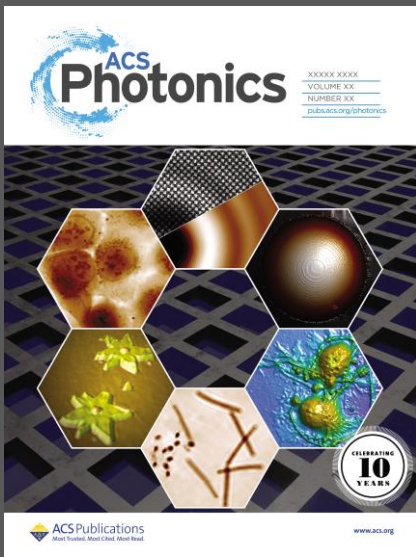
*Cross-grating phase microscopy (CGM): In-silico experiments, noise and accuracy*

B. Marthy, G. Baffou

Opt. Commun. , 521, 128577 (2022) (2022)



[github.com/baffou](https://github.com/baffou)

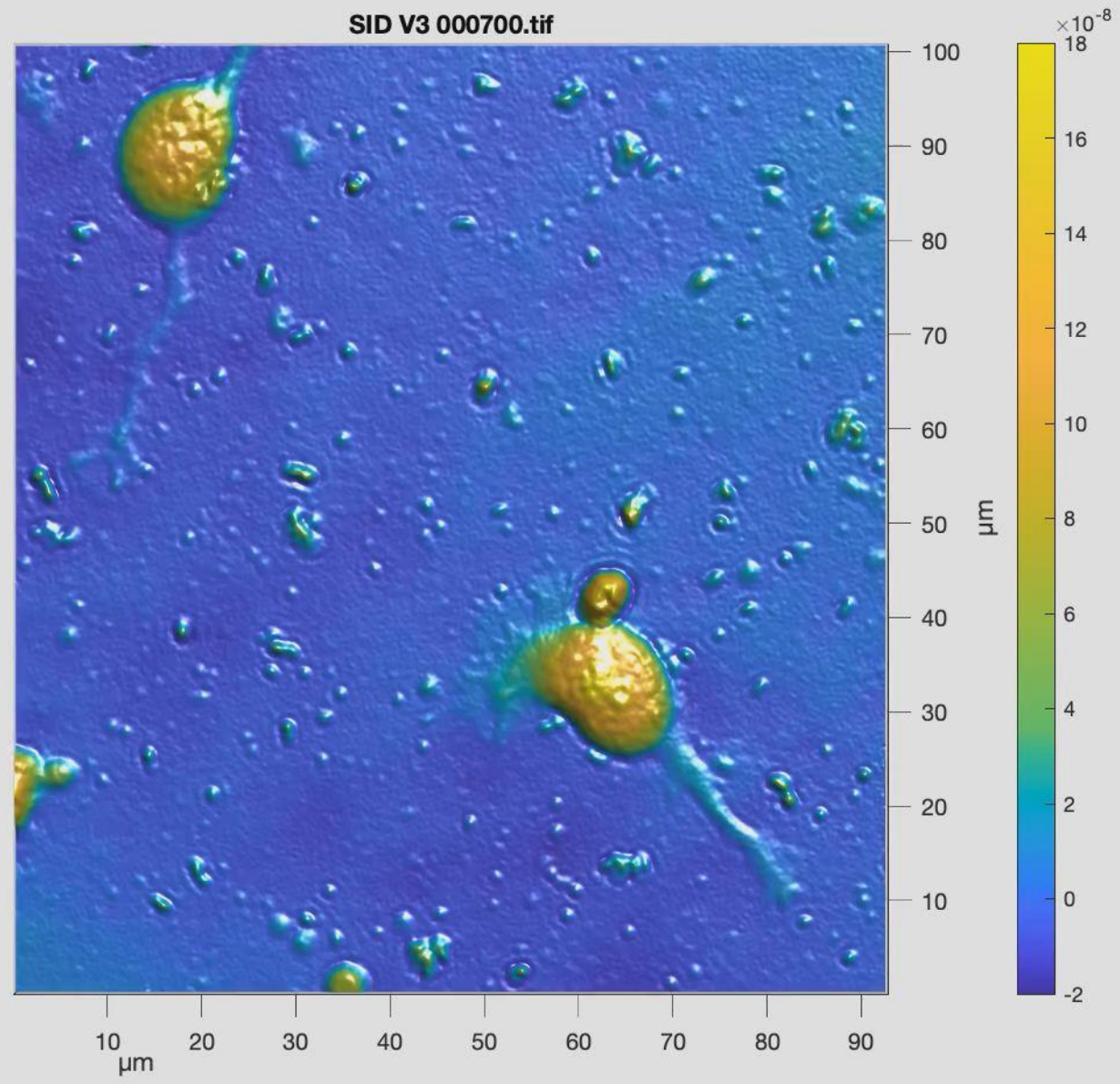


*Wavefront microscopy using quadriwave lateral shearing interferometry: from bioimaging to nanophotonics*

G. Baffou

ACS Photonics, ASAP (2023)

SID V3 000700.tif



# Session 3: Biologie 2

*Chairman : Pierre Bon*

- *Déchiffrer comment les cellules maintiennent une densité constante en utilisant des mesures simultanées de la masse sèche et du volume. **Mathieu Piel**, Institut Curie*
- *IDML aléatoire avec un diffuseur mince : application en microscopie. **Pascal Berto**, Institut de la Vision*
- *Apprentissage profond sur les valeurs complexes du champ électromagnétique appliqué à l'imagerie quantitative de phase. **Guillaume Maucort**, Institut d'Optique*

# Session 3: Biologie 2

*Chairman : Pierre Bon*

- *Déchiffrer comment les cellules maintiennent une densité constante en utilisant des mesures simultanées de la masse sèche et du volume. **Mathieu Piel**, Institut Curie*
- *IDML aléatoire avec un diffuseur mince : application en microscopie. **Pascal Berto**, Institut de la Vision*
- *Apprentissage profond sur les valeurs complexes du champ électromagnétique appliqué à l'imagerie quantitative de phase. **Guillaume Maucort**, Institut d'Optique*

# IDML aléatoire avec un diffuseur mince : application en microscopie

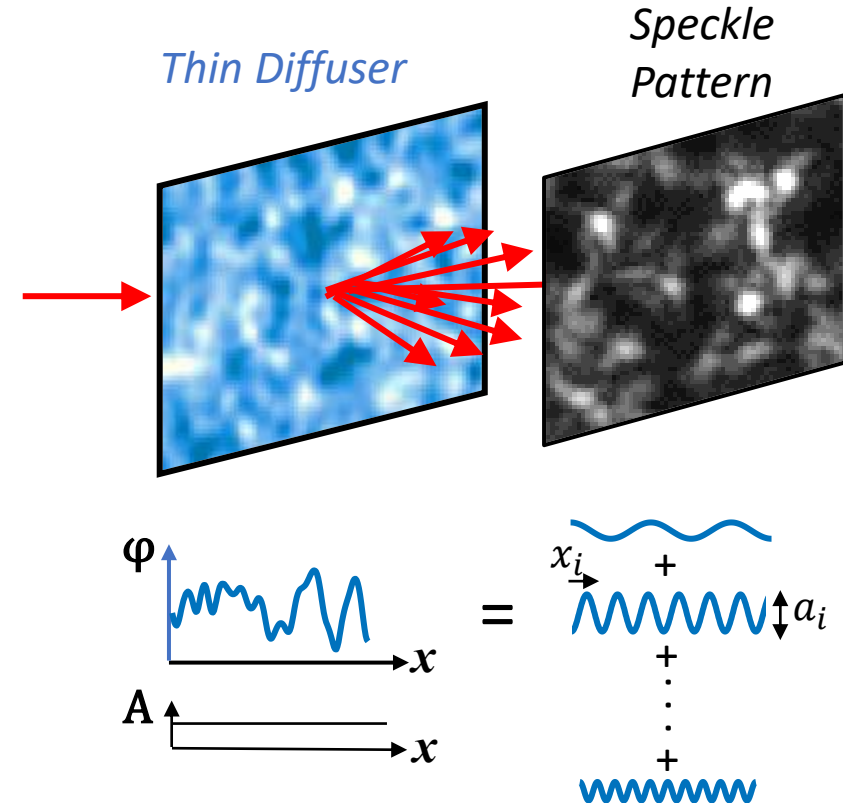
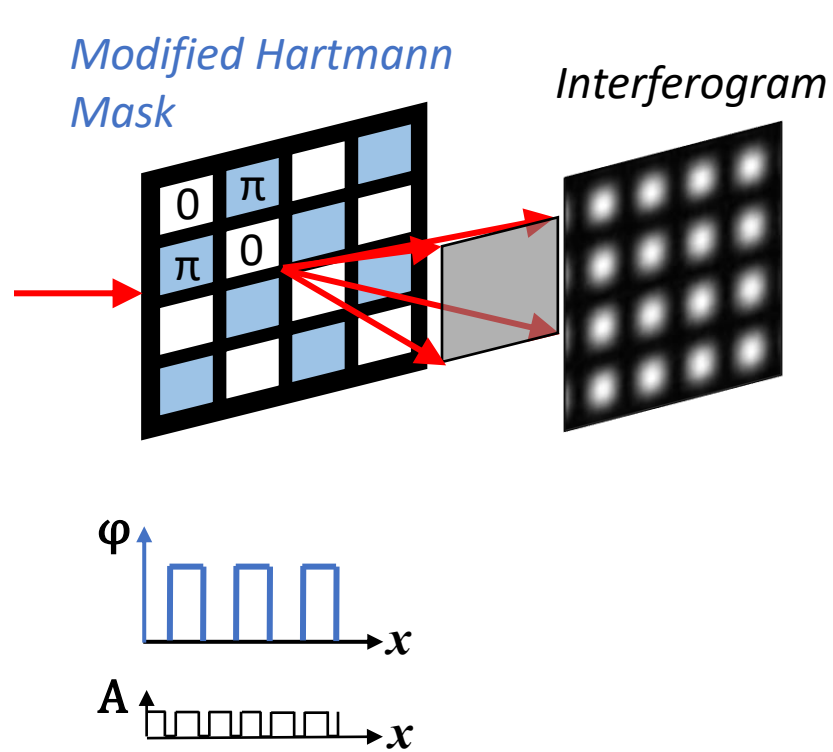
Pascal Berto

Institut de la vision





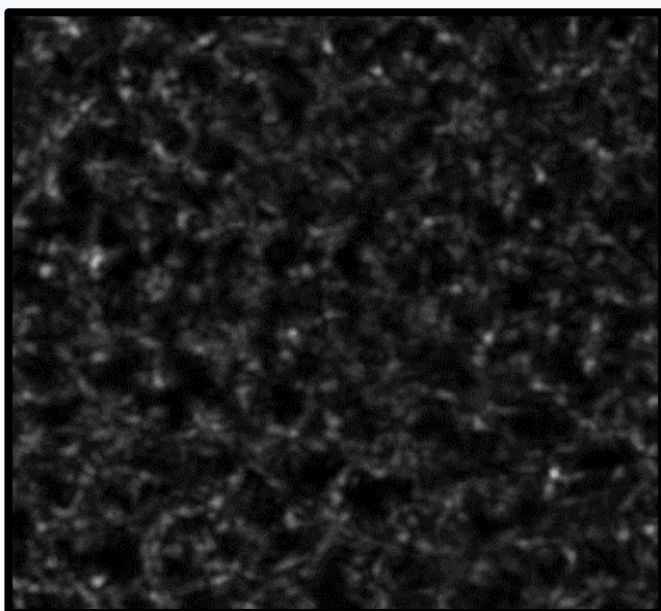
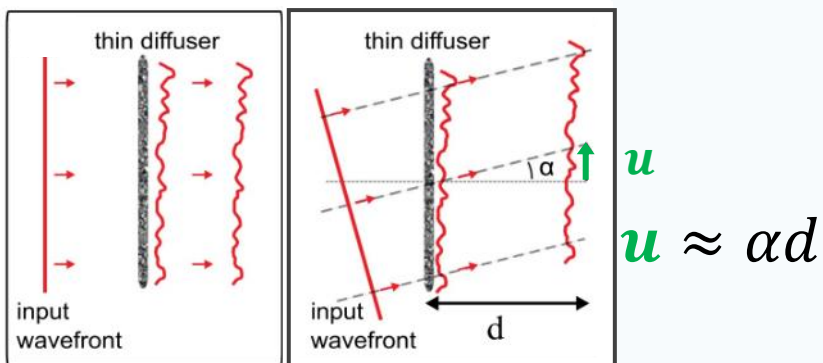
# Thin diffuser as Hartmann Mask?



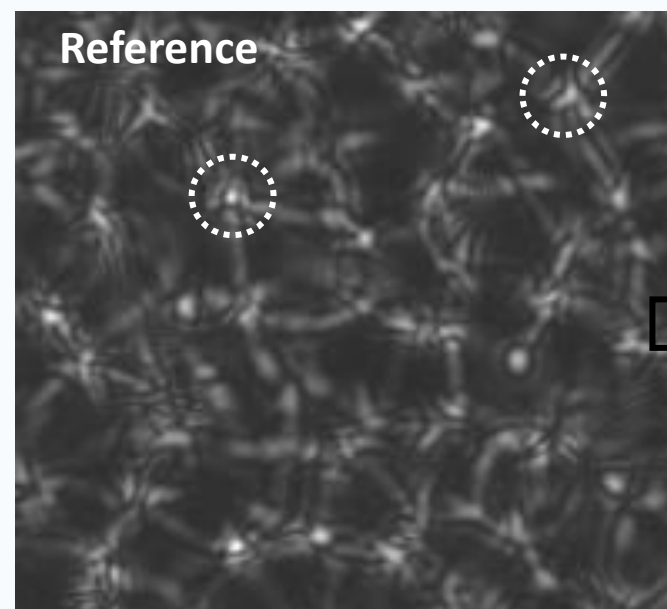
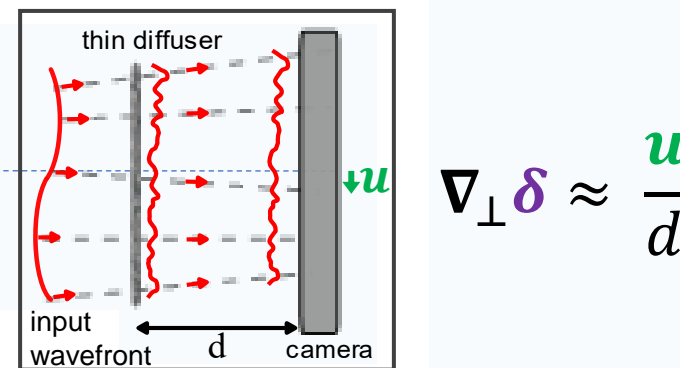
# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Principle



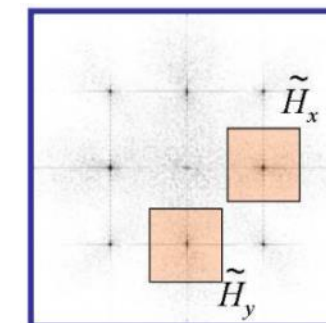
## Thin diffuser « memory effect »



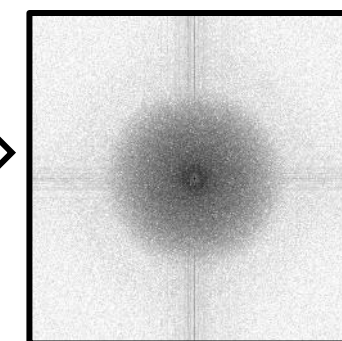
## Local Slope estimation



## QLSI



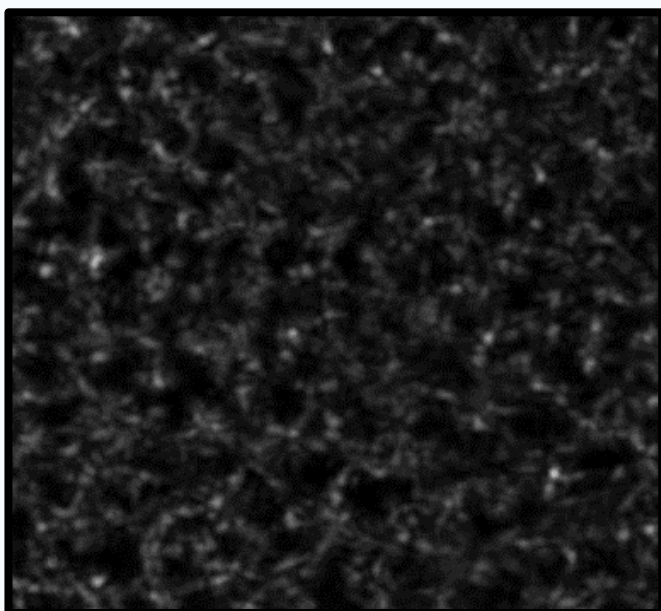
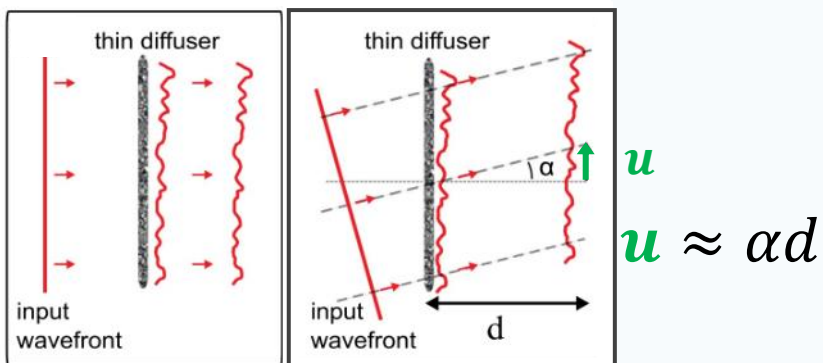
## Diffuser-based



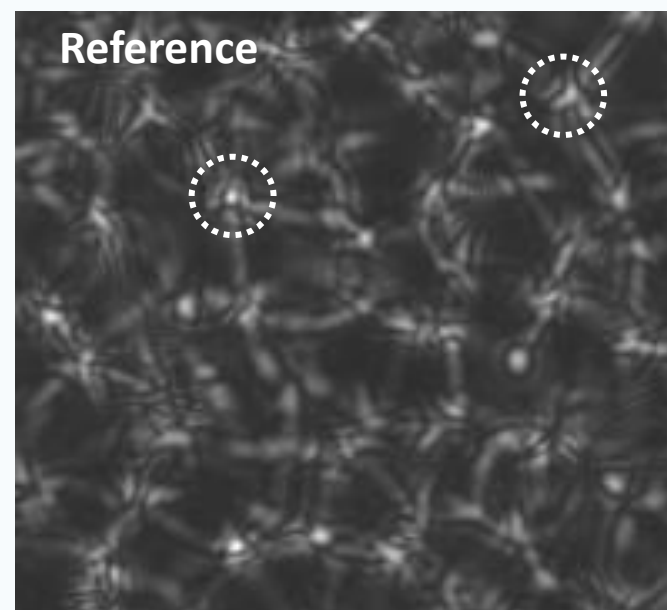
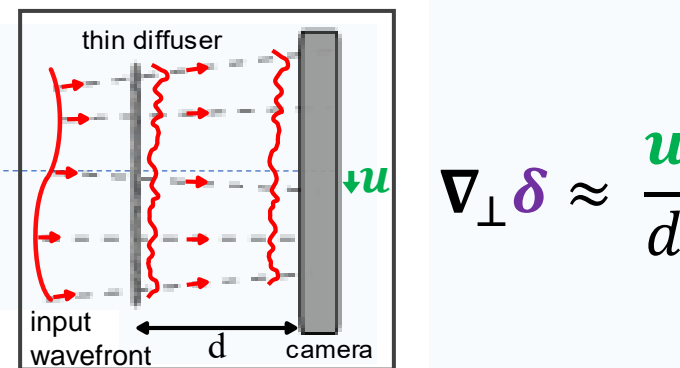
FT



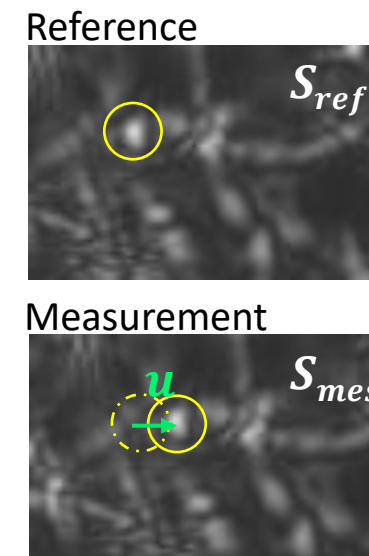
## Thin diffuser « memory effect »



## Local Slope estimation



## Non rigid registration



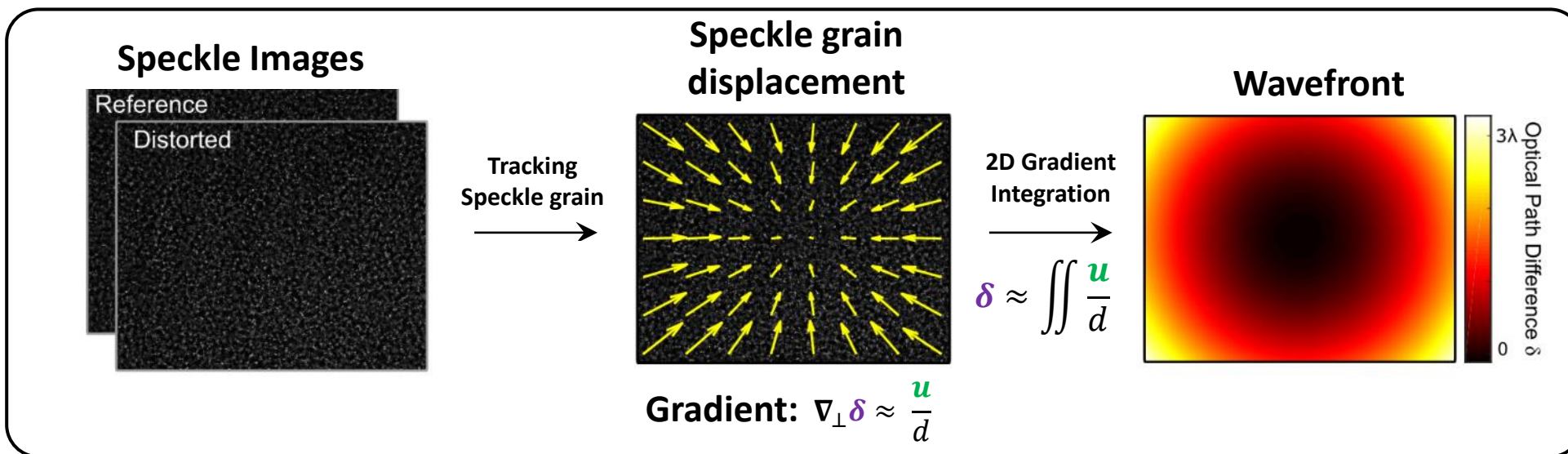
- Local cross-correlation
- Demon's algorithm
- Optical flow

$$S_{ref}(\mathbf{r}) = S_{mes}(\mathbf{r} + \mathbf{u})$$

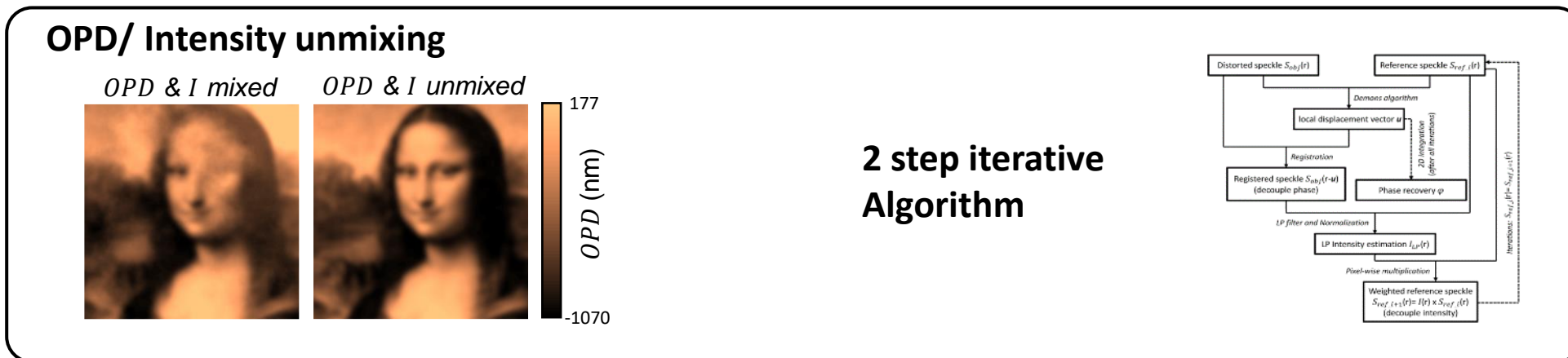
$$\|\mathbf{u}\| \ll \text{Speckle Grain}$$

$$S_{ref} = S_{mes} + \mathbf{u} \cdot \nabla S_{mes}$$

# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Principle



P. Berto, H. Rigneault and M. Guillon, *Optics Letters* 2017

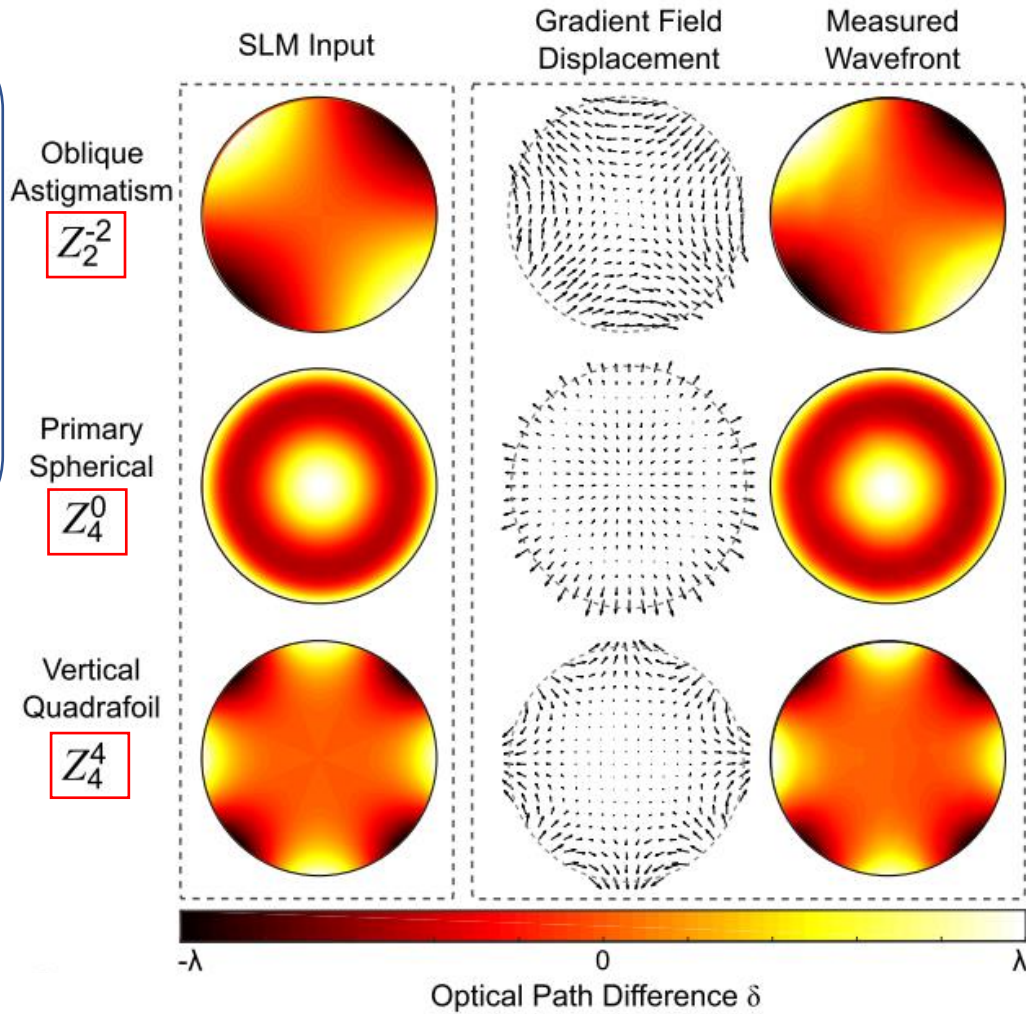
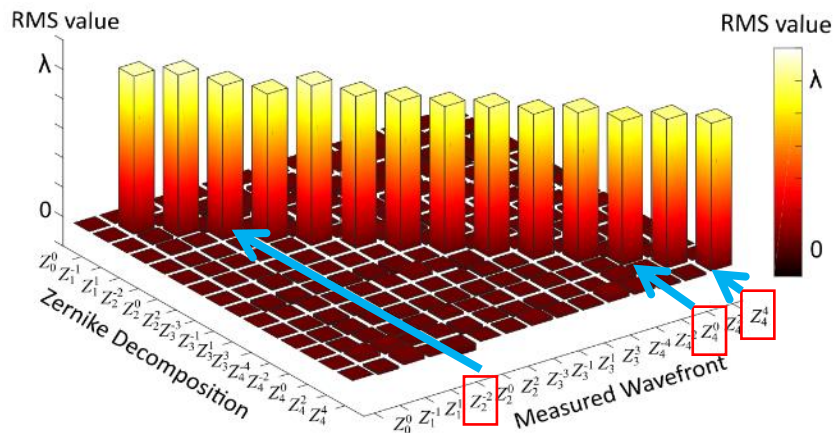
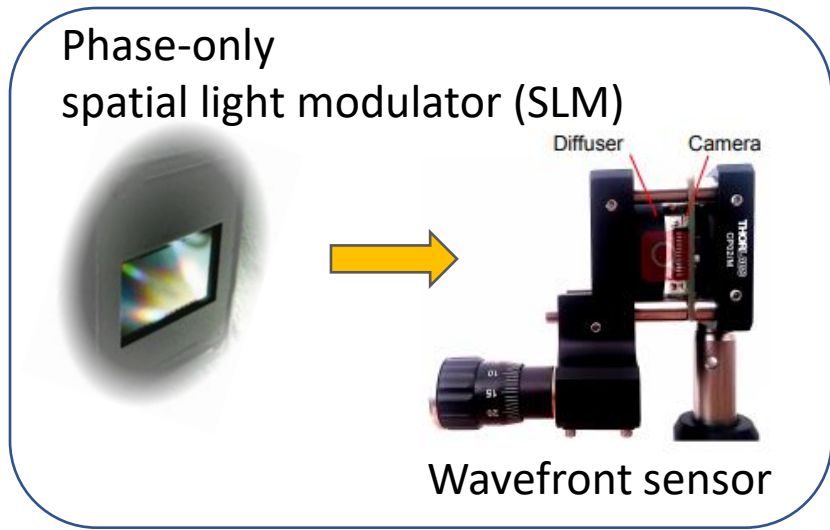


T. Wu, M. Guillon, C. Gentner, H. Rigneault, G. Tessier, P. Bon, and P. Berto, *Opt. Lett.* 2022

T. Wu



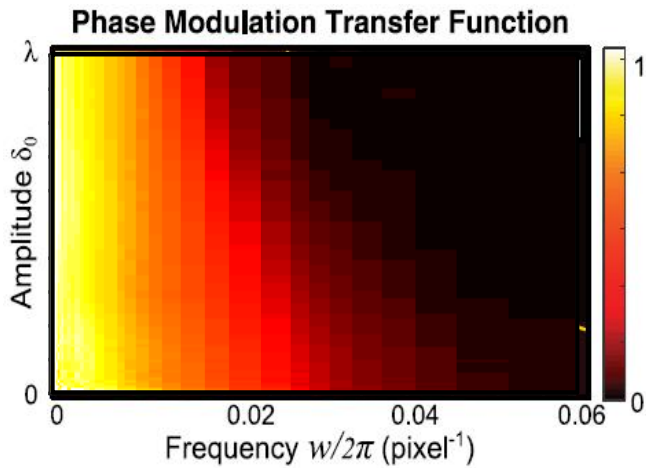
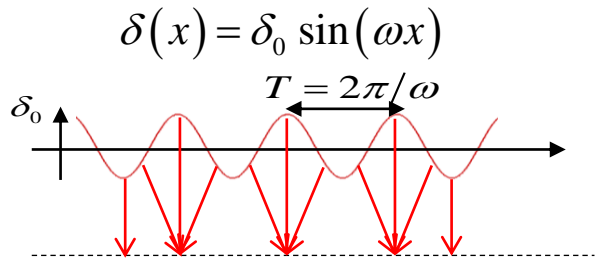
# Quantitative Phase measurement



➡ Quantitative phase measurement

# Imaging Performances

**Input:** Sine-modulated phase function:

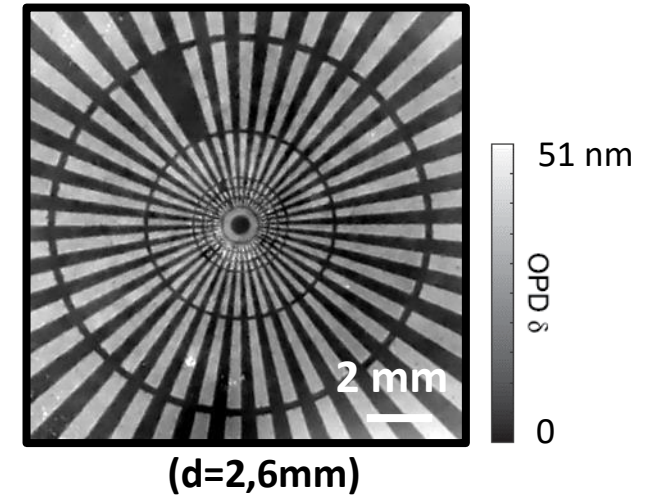


**For strong wavefront curvature :**

⇒ overlap of the speckle grains

$$\delta_0 \geq \frac{1}{\omega^2 d}$$

Siemens Phase Target  
(height: 50nm)

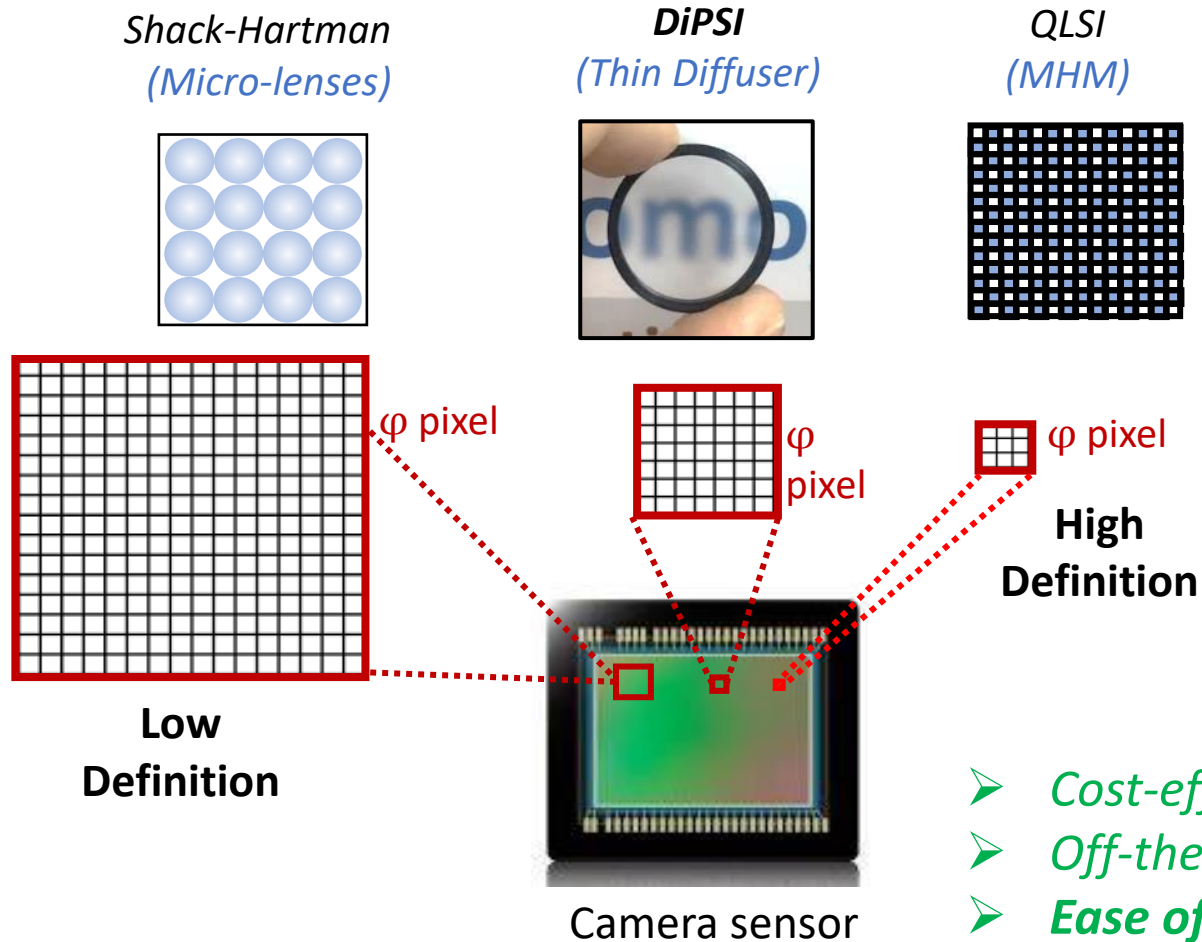


Phase-pixel size:  
8x8 pxs



# Wavefront Imaging with a diffuser

## 1- Wavefront Imaging



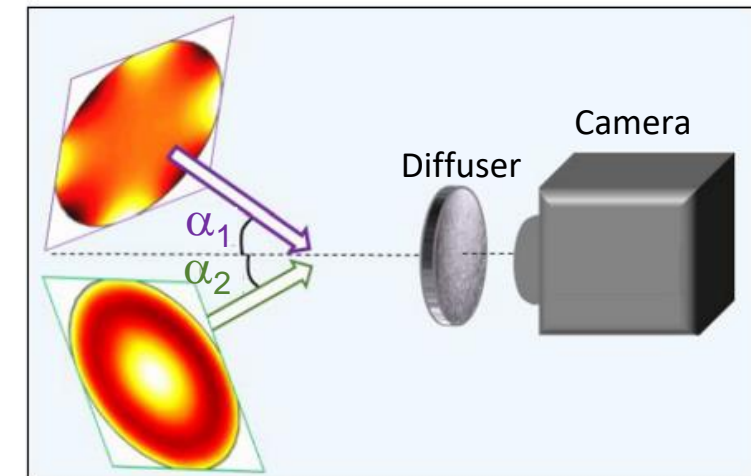
- *Cost-effective fabrication*
- *Off-the-shelf component*
- *Ease of dissemination*

## 2 - Multiplexing capabilities

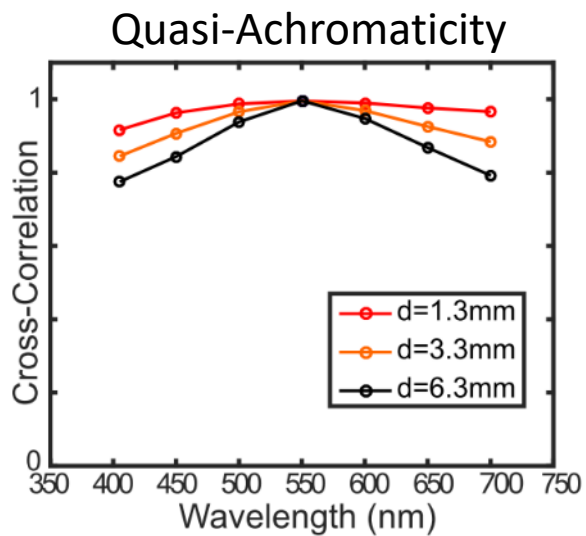
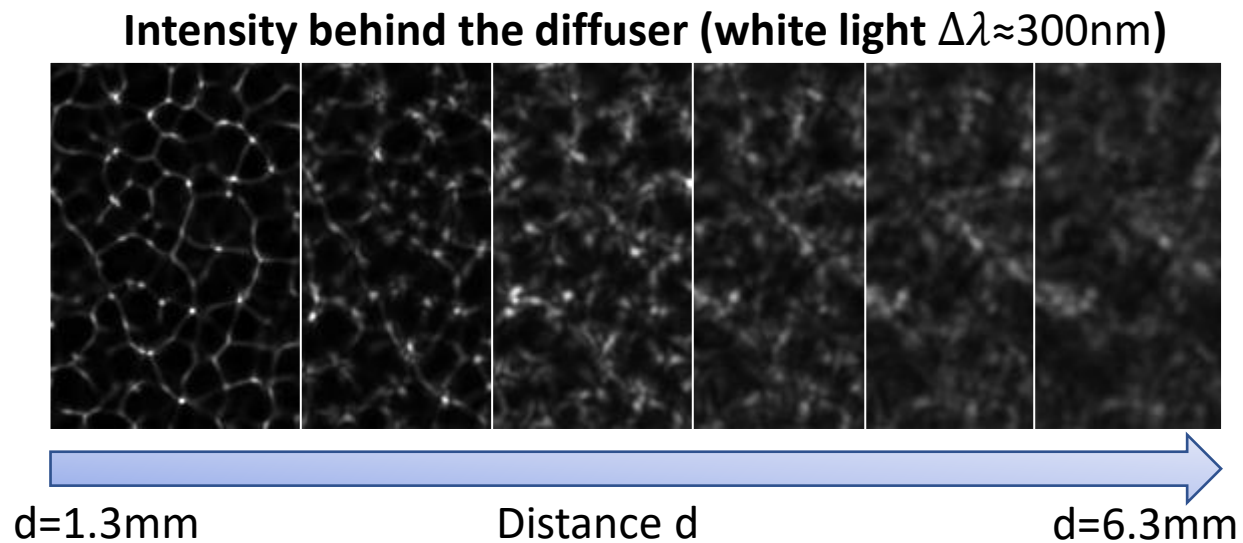
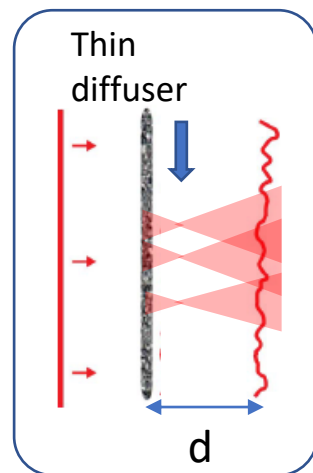
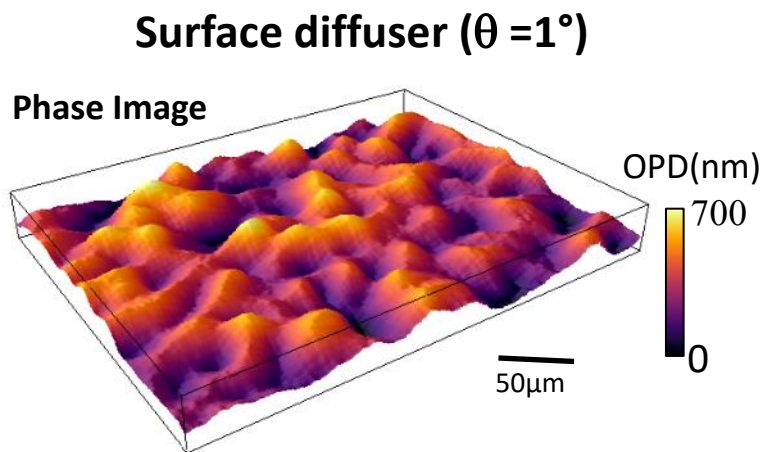
Diffuser: Random mask

➔ *New modalities*

### Multi-Angle WFS



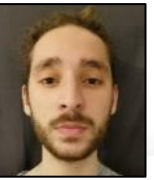
# Speckle and chromaticity



Chromato-Axial  
memory effect



# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Specifications and Applications



A. Aggoun

➤ **Compatible Broadband Light source**

Native microscope illumination

➤ **Imaging Capabilities**

Phase Pixel size: 8x8 px

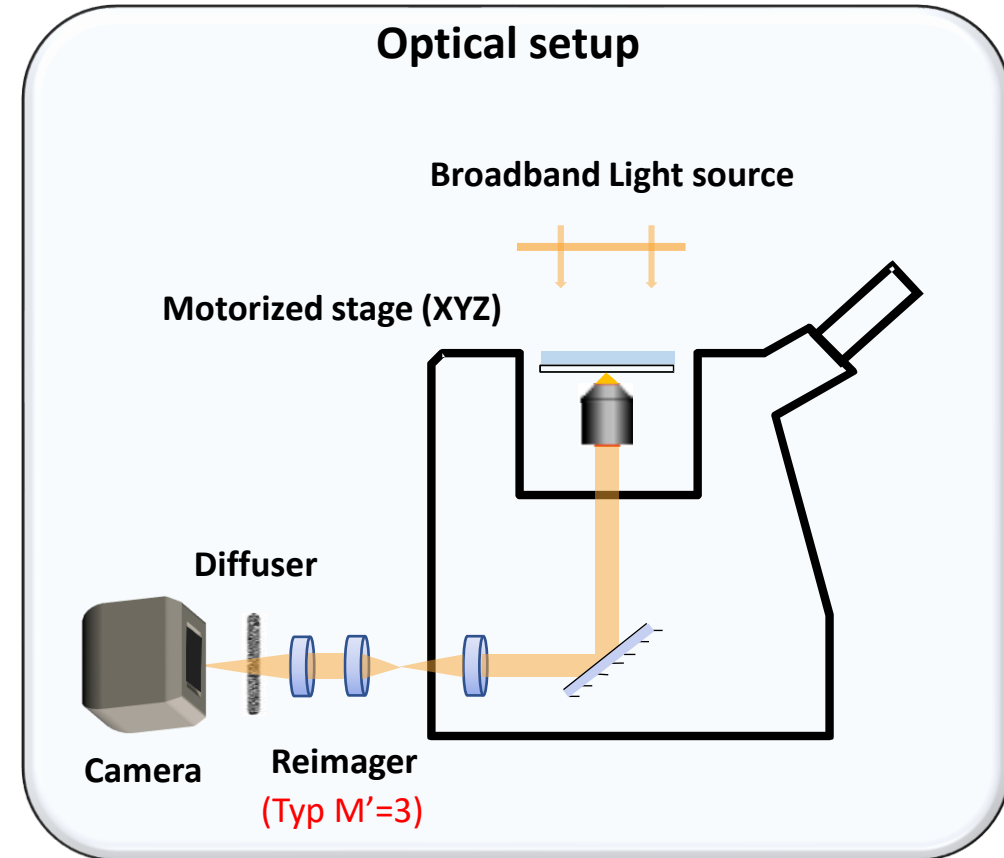
→ typ. 256x256 phase pixels

for 2048x2048 pixels sensor

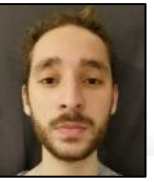
**Limitation**

$$PSF_{im} = 1.22 \frac{\lambda}{NA} M_{obj} M' > 2 \cdot \text{Phase pixel}$$

→ **Reduced Field of view**

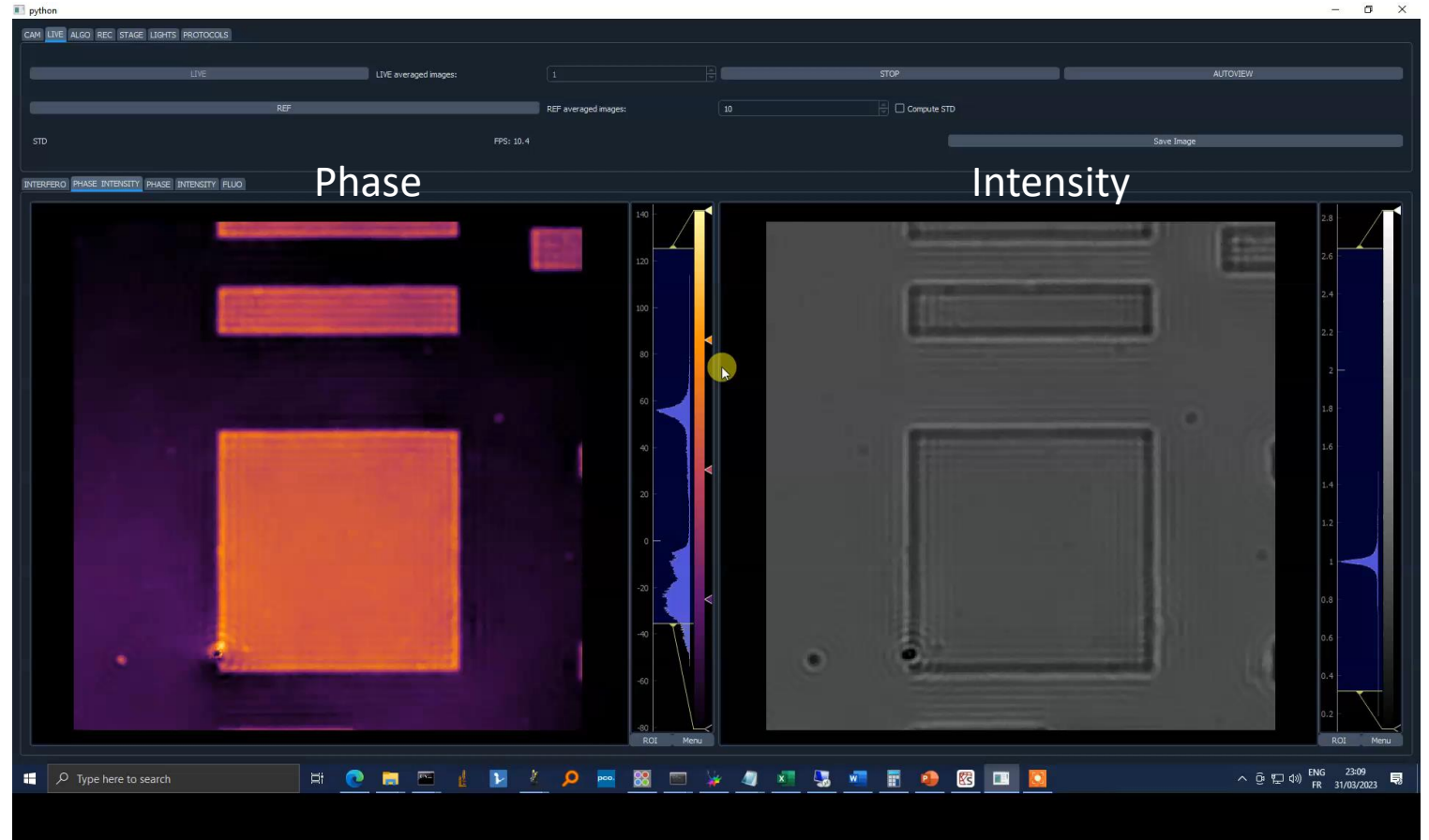
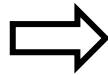
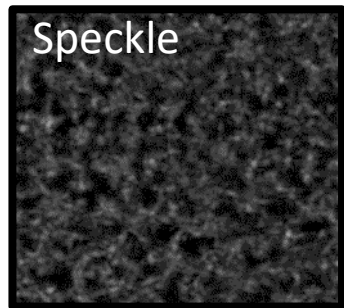


# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Performance



A. Aggoun

- **Compatible Broadband Light source**  
Native microscope illumination
- **Imaging Capabilities**  
Phase Pixel size: 8x8 px  
→ typ. 256x256 phase pixels  
for 2048x2048 pixels sensor
- **Real time reconstruction**  
Speed : 45 fps  
(GPU, sensor 2048x2048 pixels)



# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Performance

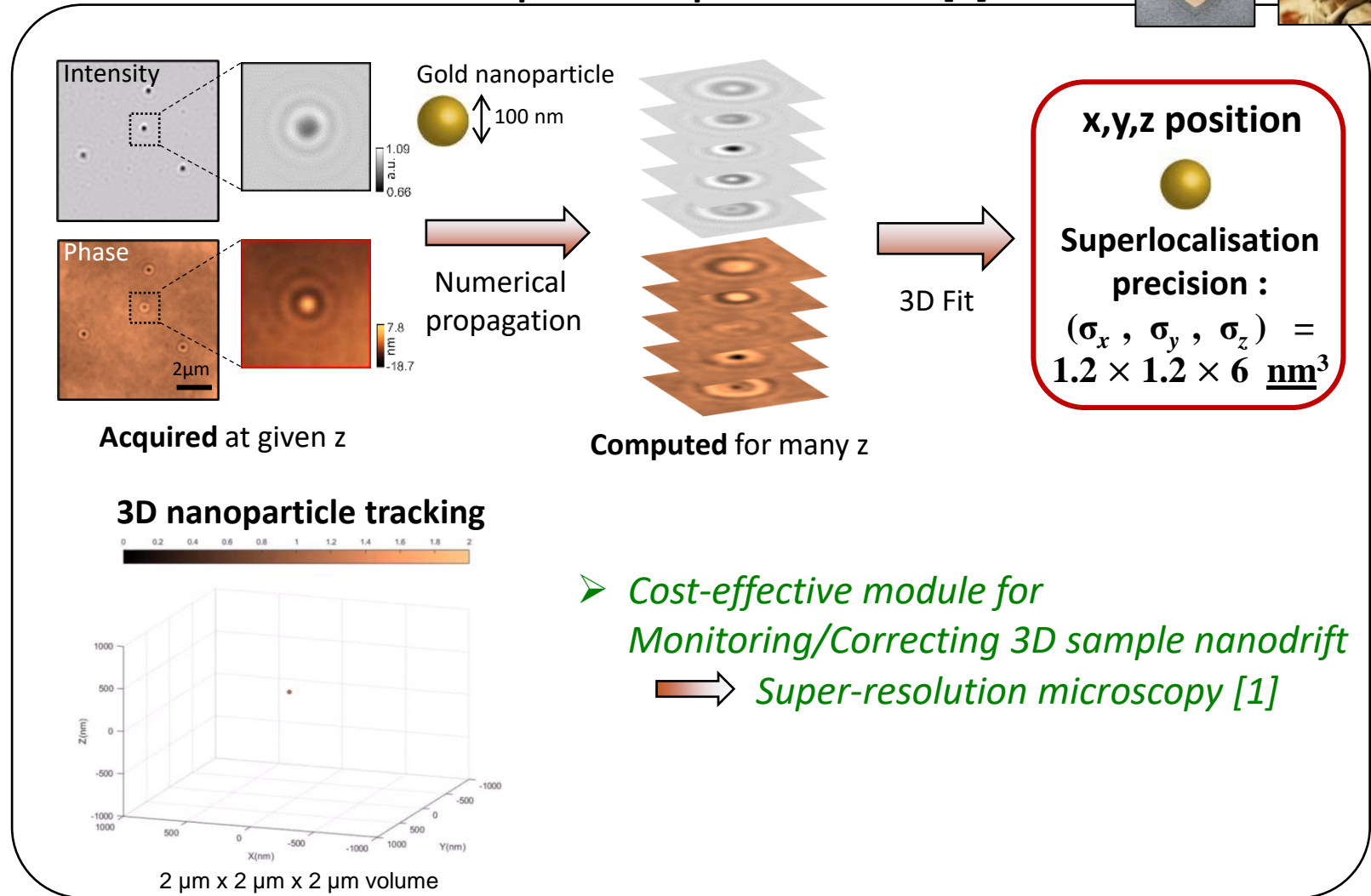
T. Wu

P. Bon



- **Compatible Broadband Light source**  
Native microscope illumination
- **Imaging Capabilities**  
Phase Pixel size: 8x8 px  
→ typ. 256x256 phase pixels  
for 2048x2048 pixels sensor
- **Real time reconstruction**  
Speed : 45 fps  
(GPU, sensor 2048x2048 pixels)
- **Phase and Amplitude Imaging**  
Enables numerical refocusing

## 3D nanoparticle superlocalisation[1]



- *Cost-effective module for Monitoring/Correcting 3D sample nanodrift*  
→ *Super-resolution microscopy [1]*

T. Wu, M. Guillon, C. Gentner, H. Rigneault, G. Tessier, P. Bon, and P. Berto,

Opt. Lett. 2022

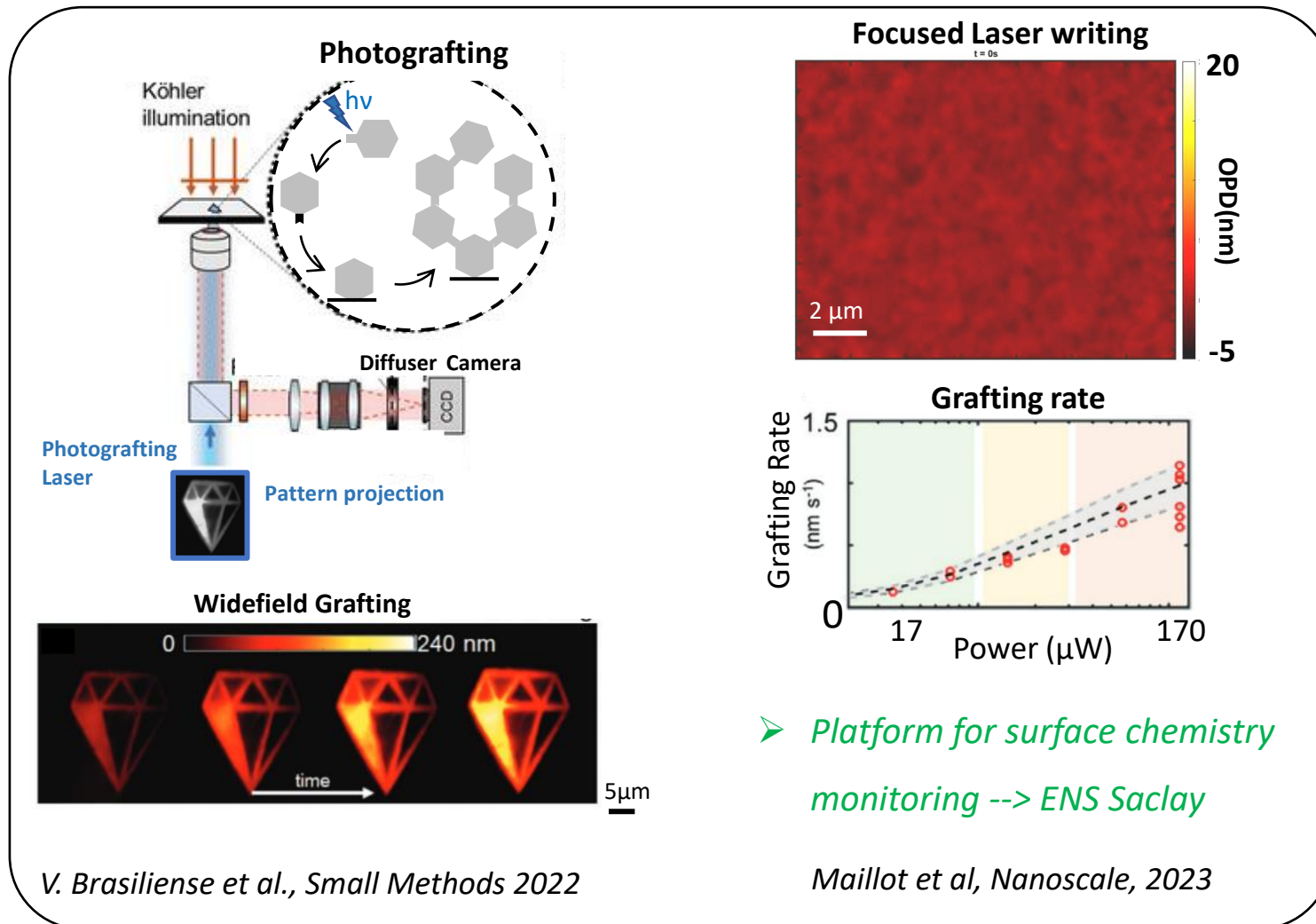
# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Performance



V. Brasiliense

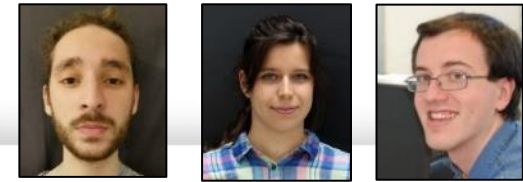
- **Compatible Broadband Light source**  
Native microscope illumination
- **Imaging Capabilities**  
Phase Pixel size: 8x8 px  
→ typ. 256x256 phase pixels  
for 2048x2048 pixels sensor
- **Real time reconstruction**  
Speed : 45 fps  
(GPU, sensor 2048x2048 pixels)
- **Phase and Amplitude Imaging**  
Enables numerical refocusing
- **Sensitivity**  
OPD noise = 800 pm

## In operando surface chemistry monitoring

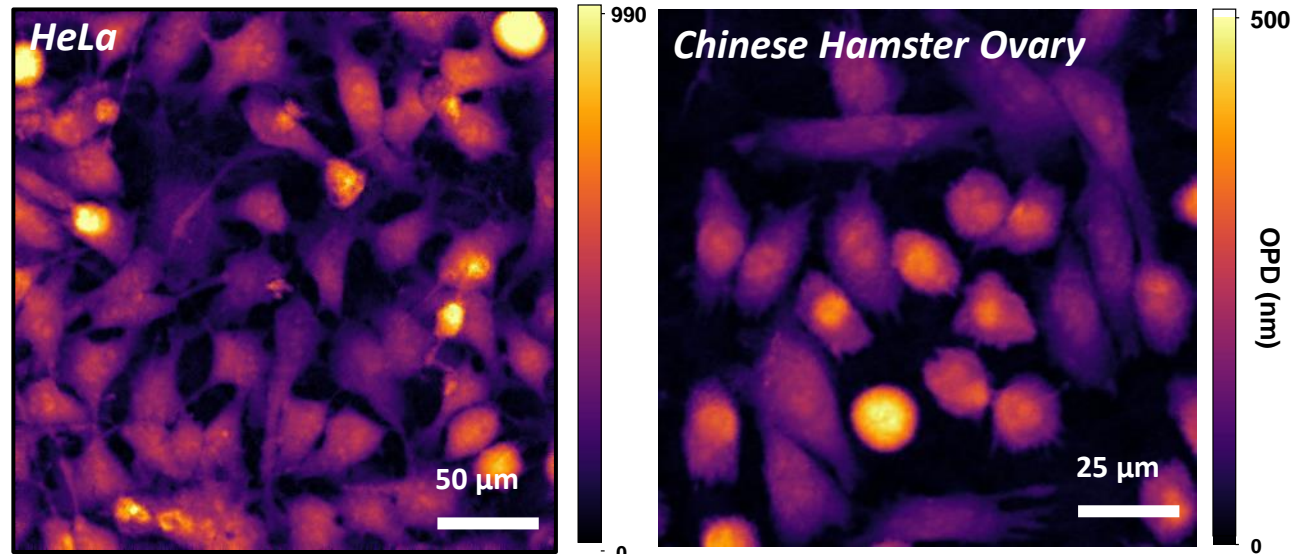


- Platform for surface chemistry monitoring --> ENS Saclay

# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Bio-applications

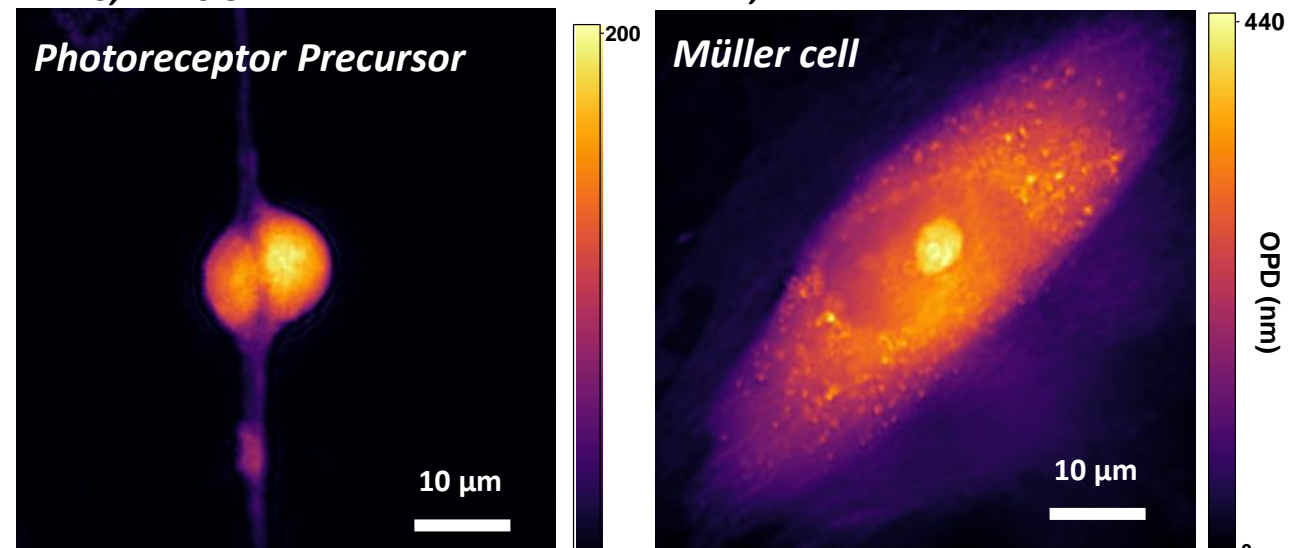


A. Aggoun C. Gentner B. Rogez



*M=40, NA=0.5*

*M=80, NA=0.5*



*M=200, NA=1.4*

*M=200, NA=1.4*

Dry matter measurement

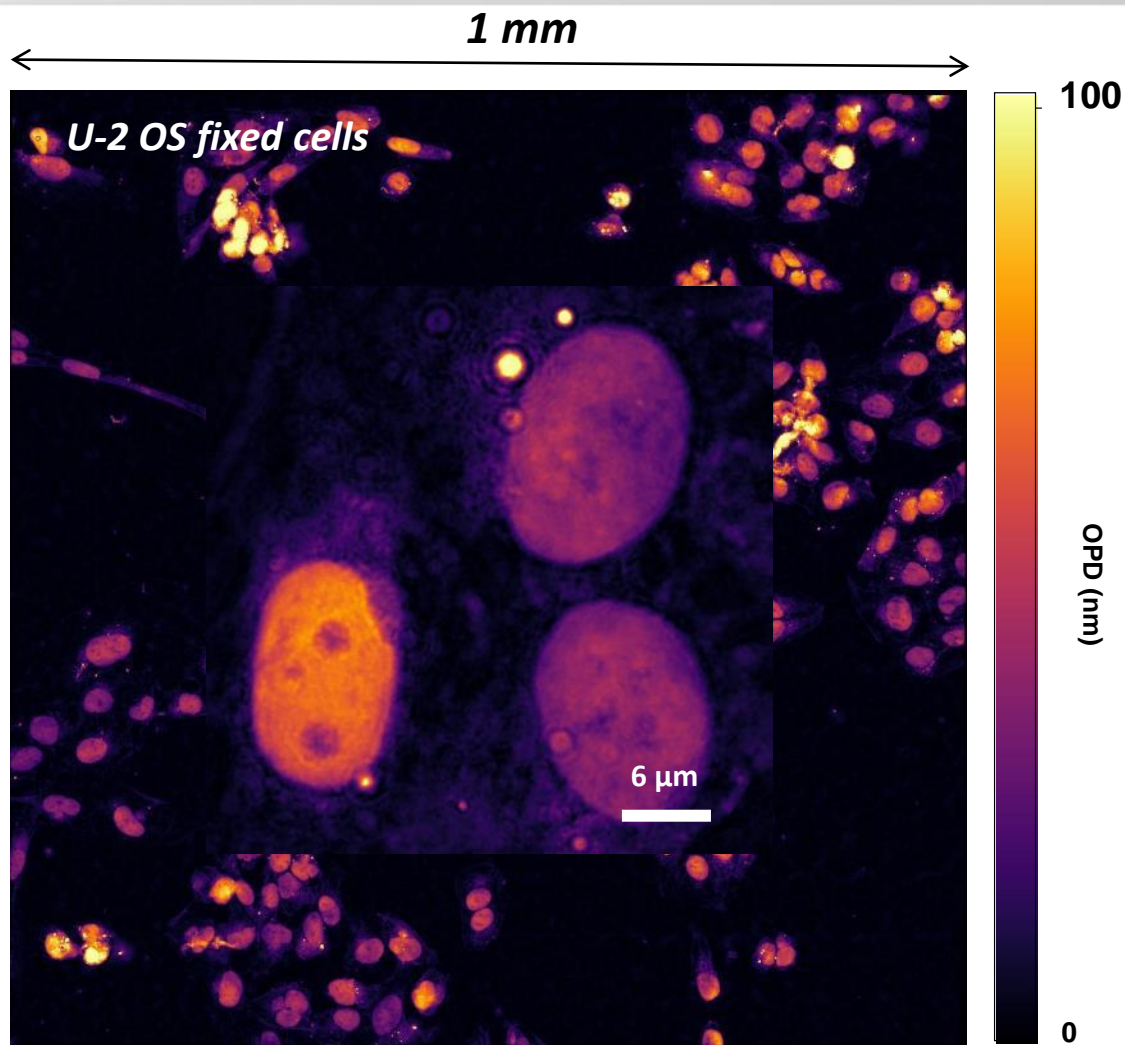
$$m \propto \iint_S \delta \, dS$$

Dry mass monitoring

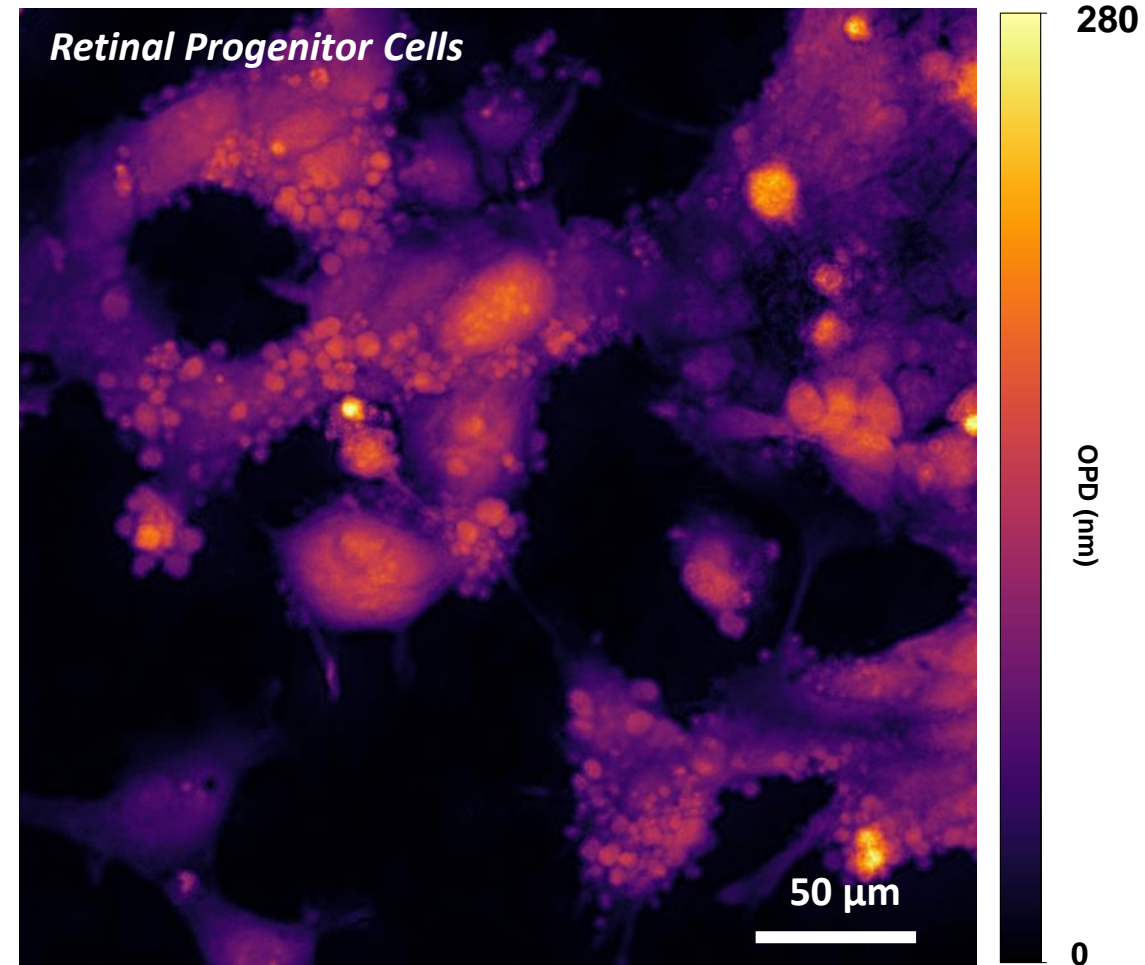
# Diffuser Phase Sensing and Imaging: Bio-applications



A. Aggoun



Stitched (30x30) M=300, NA=1.4



Stitched (7x7) M=200, NA=1.4

Stitching algorithm: MIST

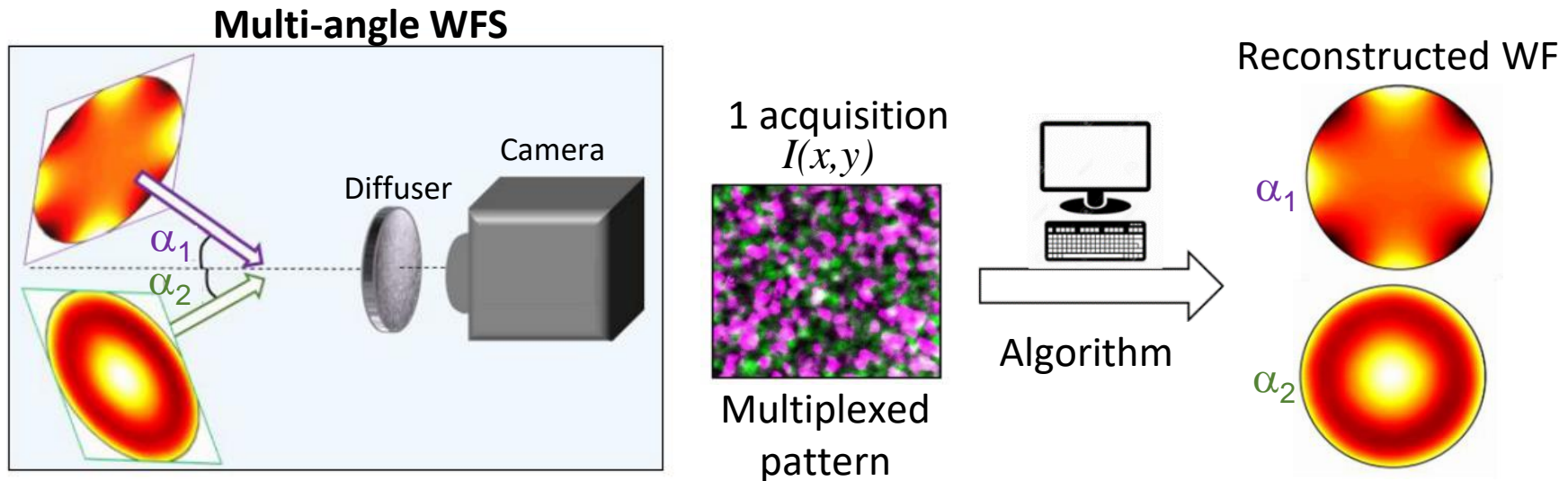
# Multiplexed WaveFront Sensing

Use of random Hartmann mask

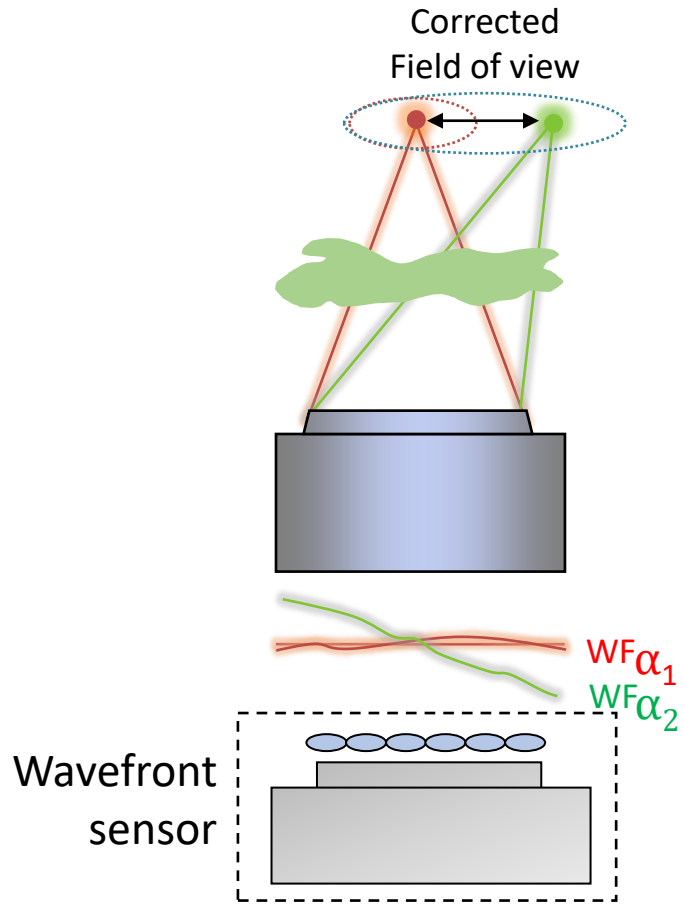
➔ Can bring new WFS modality

Speckle pattern: Unique signature

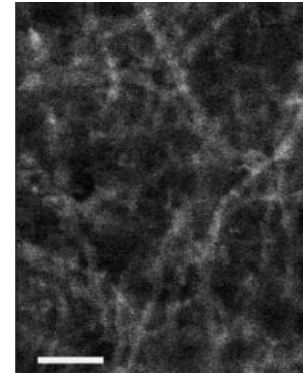
➔ Single-shot measurement of several wavefronts incoming from different inclination



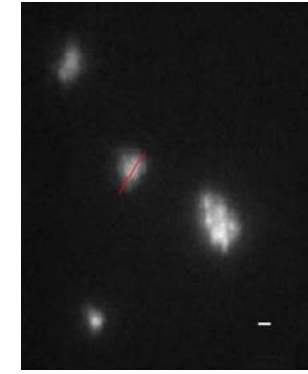
# Direct Wavefront sensing and adaptive optics



With aberration



*K. Wang et al., Nat. Commun. 2015*



*O. Azucena et al., Opt. Lett. 2011*

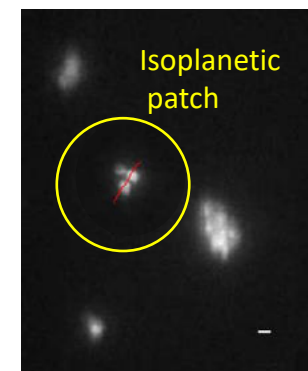
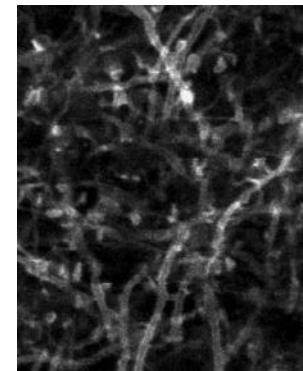
Hardware correction

- Deformable Mirror
- SLM

PSF Deconvolution

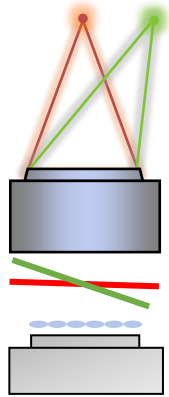


Aberration corrected

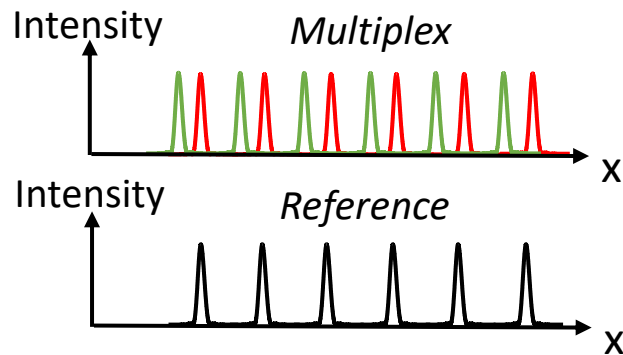
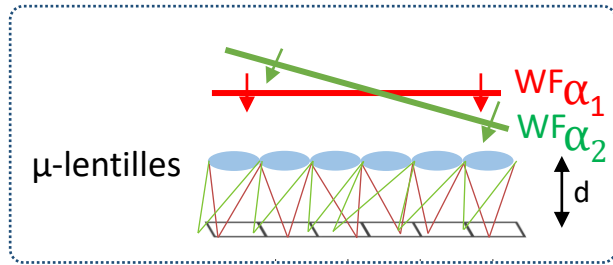




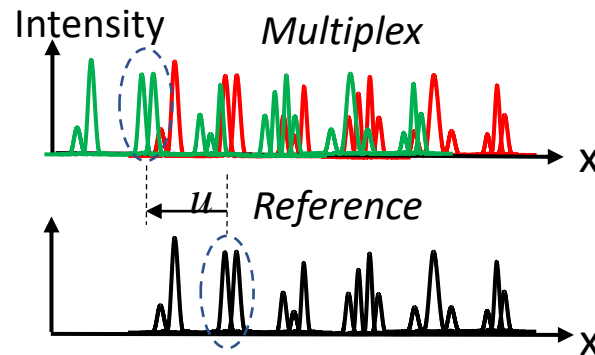
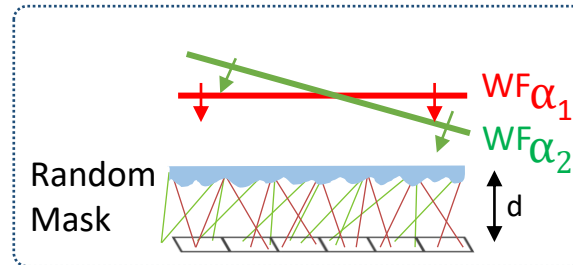
# Multiplexing with a thin diffuser



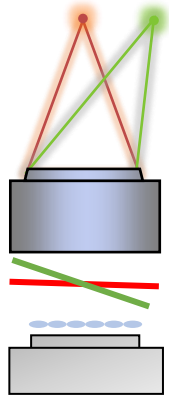
## Periodic Pattern



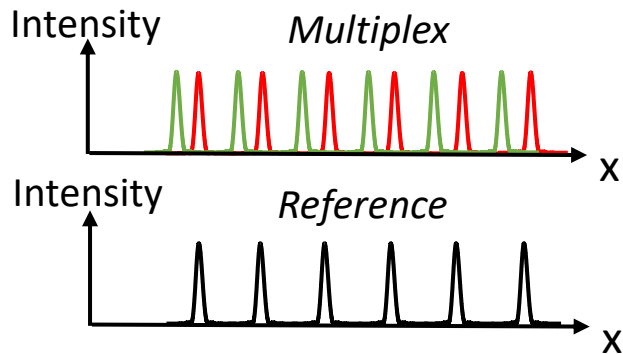
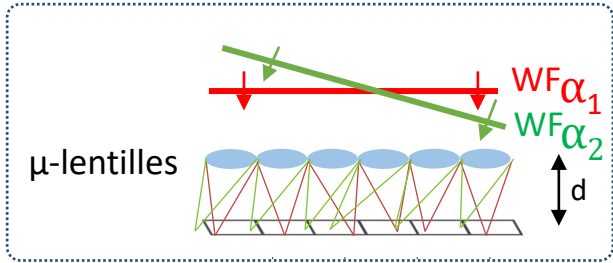
## Random Pattern



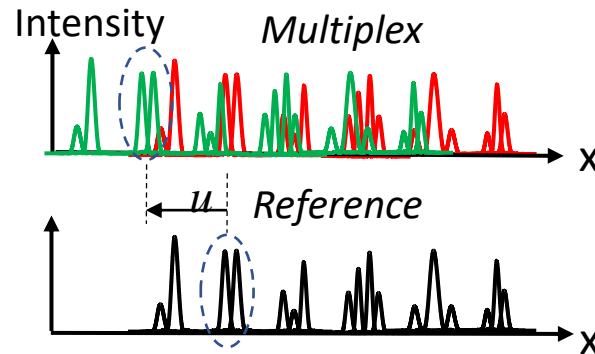
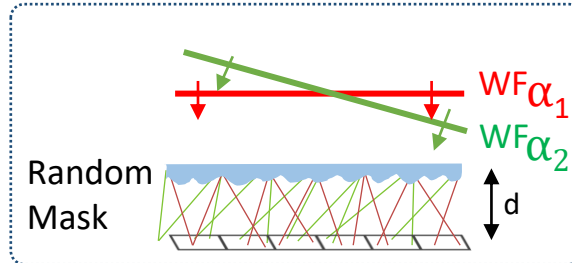
# Multiplexing with a thin diffuser



**Periodic Pattern**



**Random Pattern**

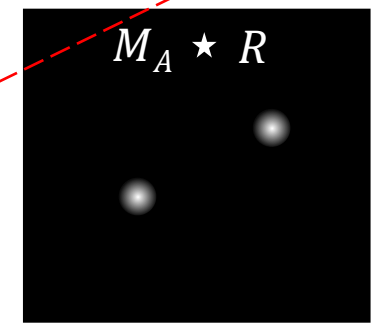
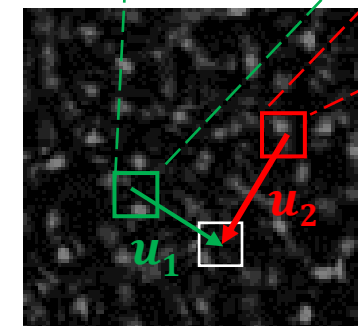
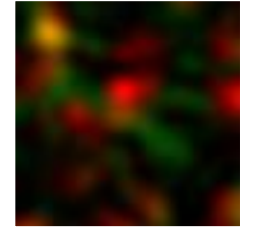


**Multiplex  $M$**

$WF\alpha_1$   
 $WF\alpha_2$

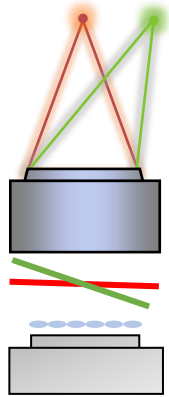


**Macro-pixel  $M_A$**

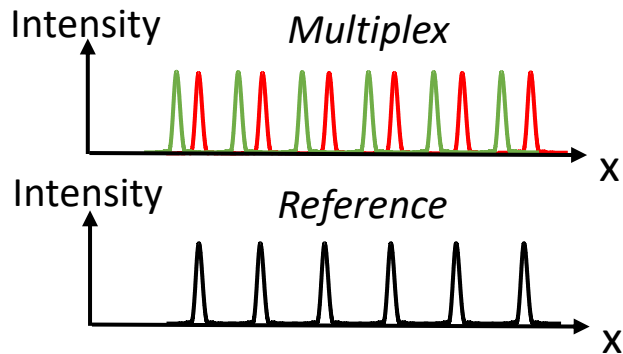
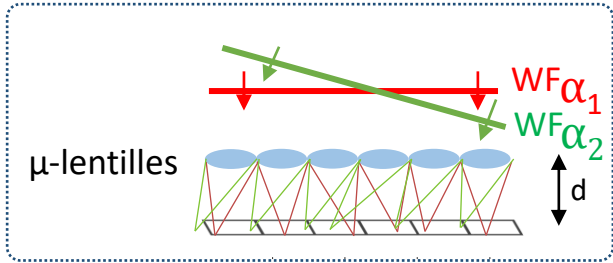


**Reference  $R$**

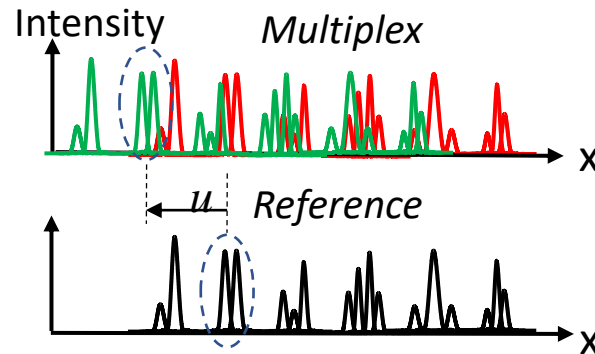
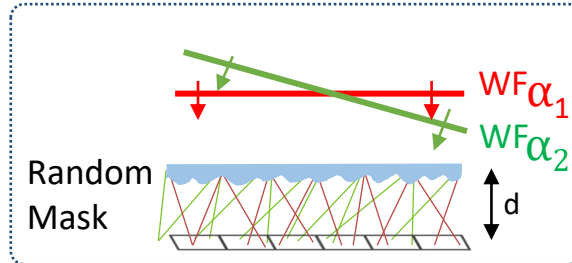
# Multiplexing with a thin diffuser



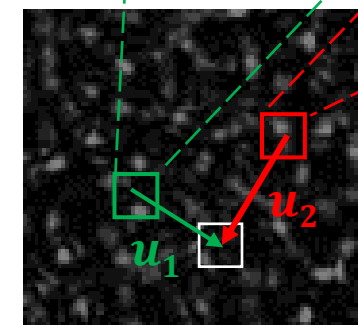
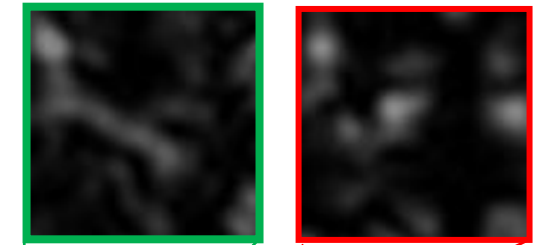
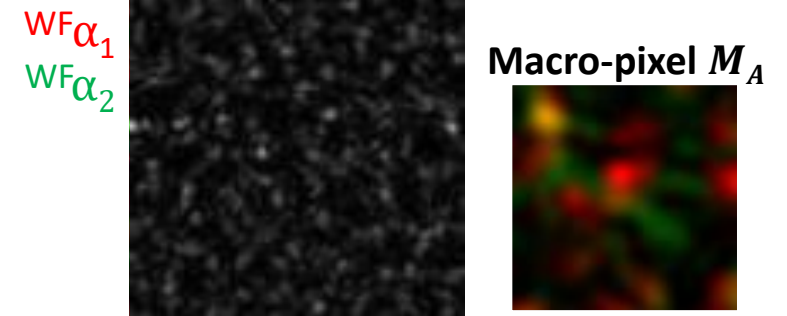
**Periodic Pattern**



**Random Pattern**



**Multiplex M**

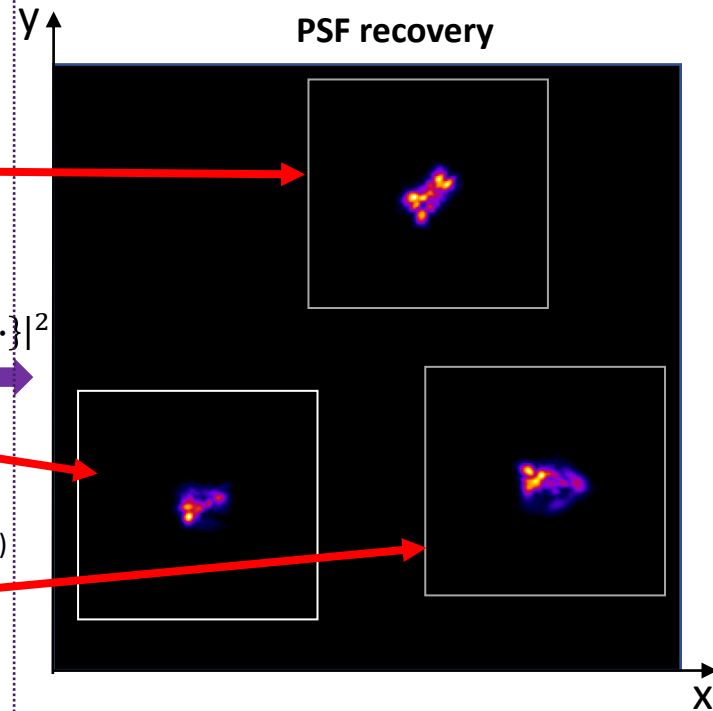
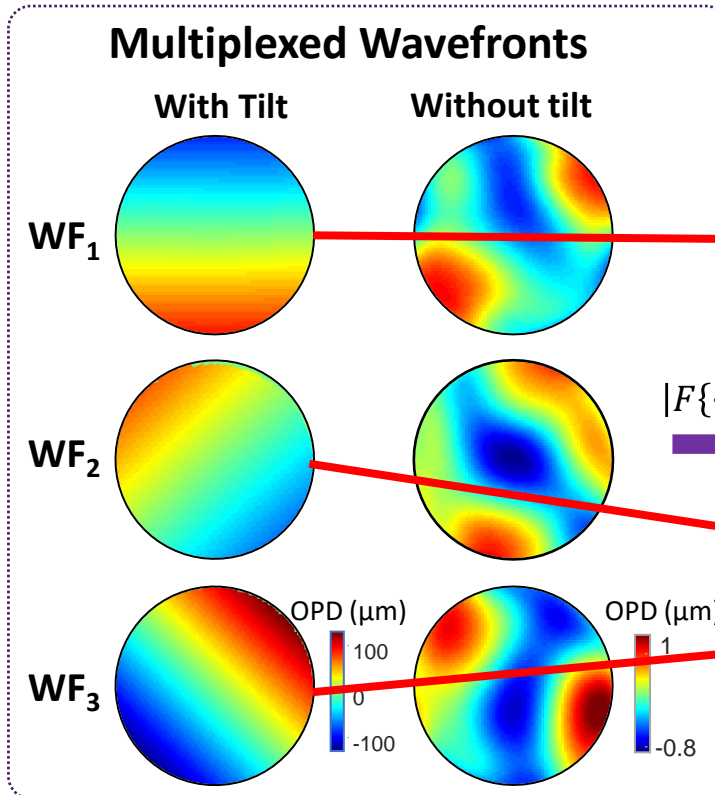
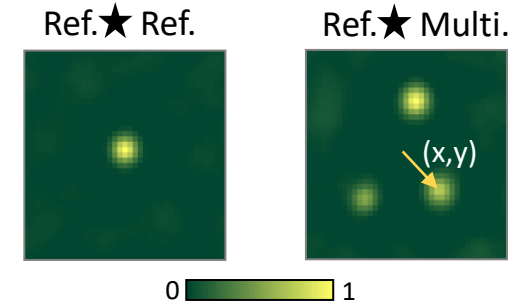
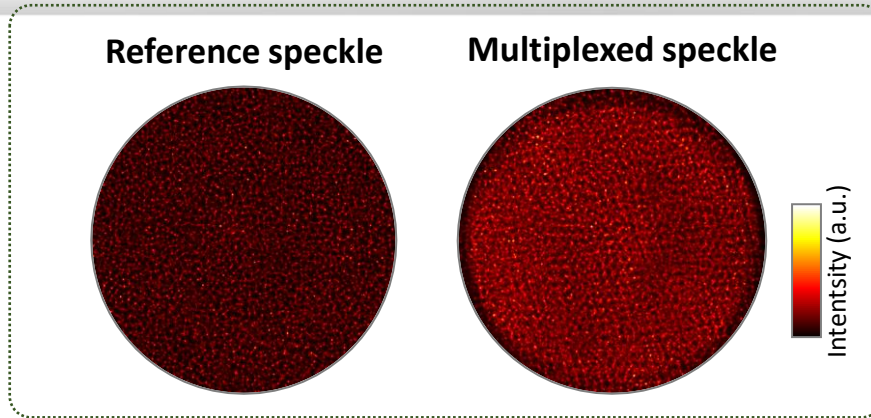
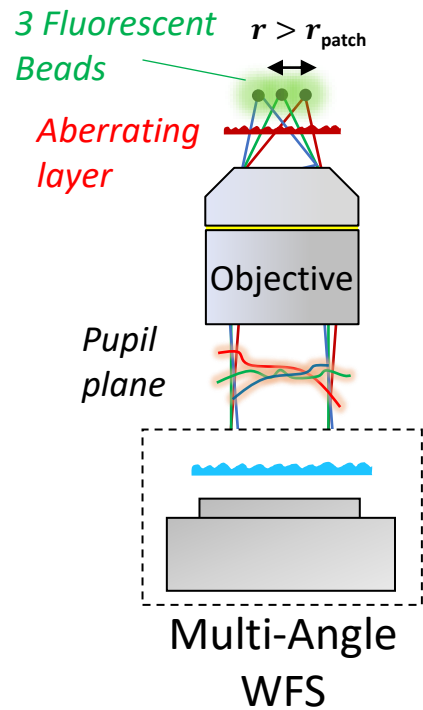


$$\nabla_{\perp} \delta_1 \approx \frac{u_1}{d}$$

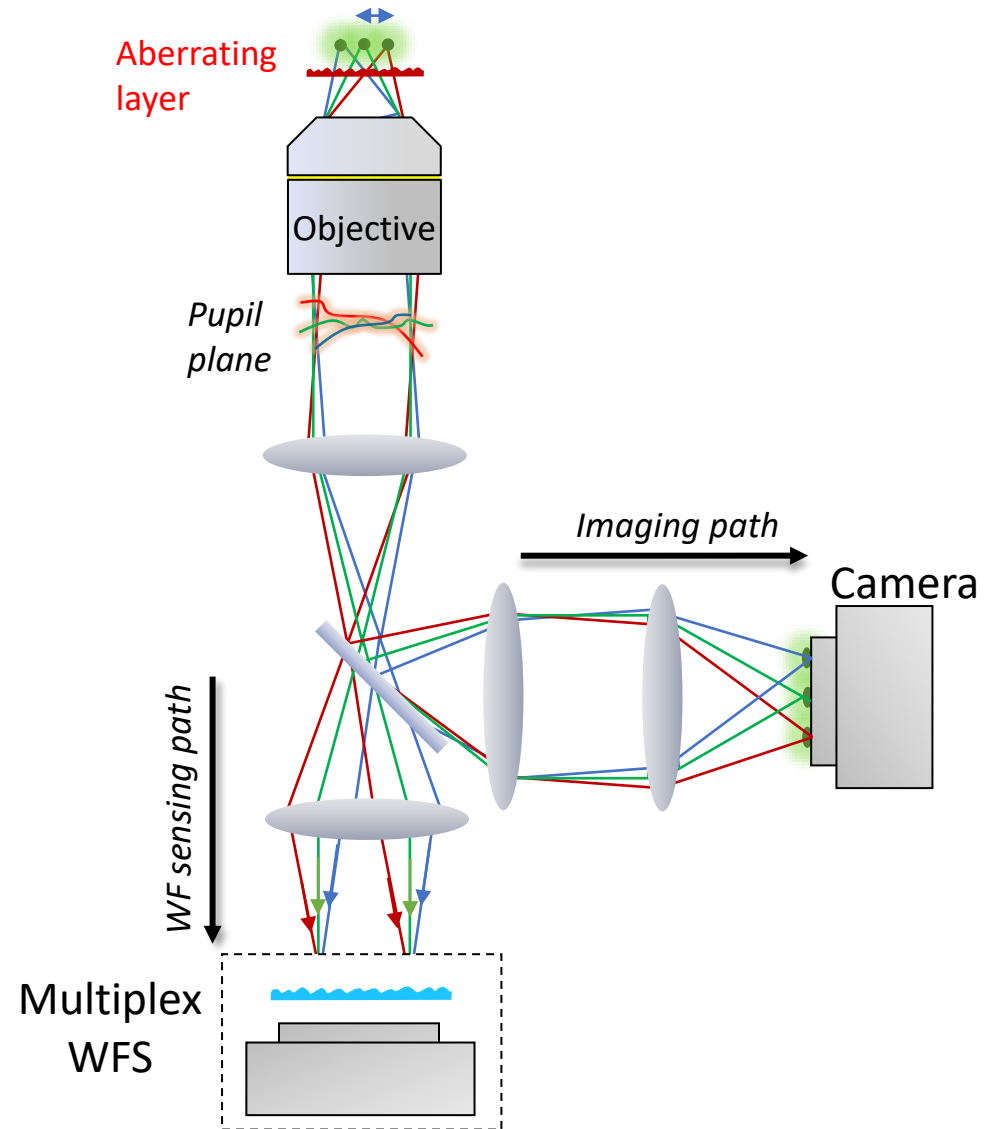
$$\nabla_{\perp} \delta_2 \approx \frac{u_2}{d}$$

**Reference R**

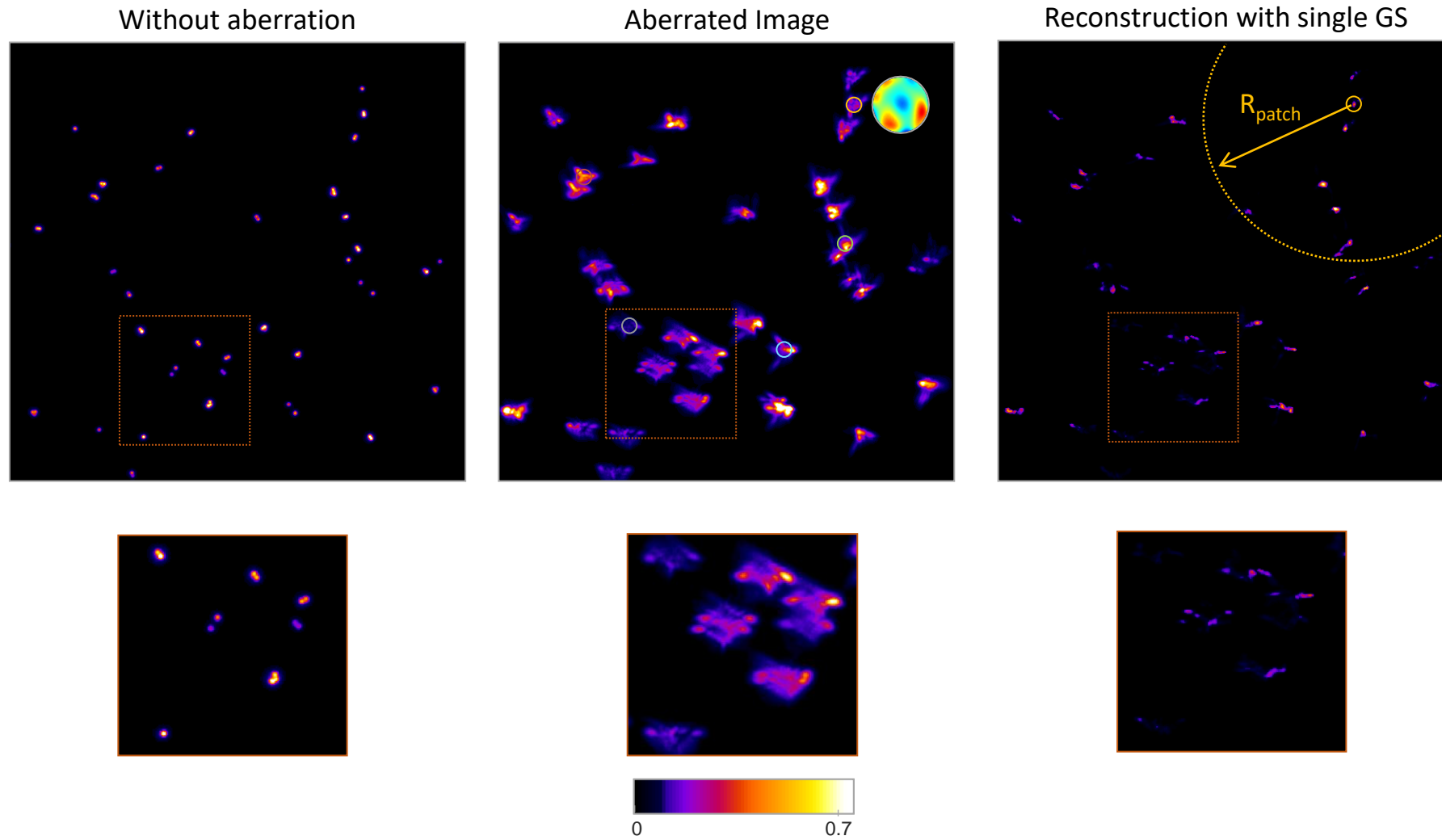
# Multiplexed WFS (Experimental).



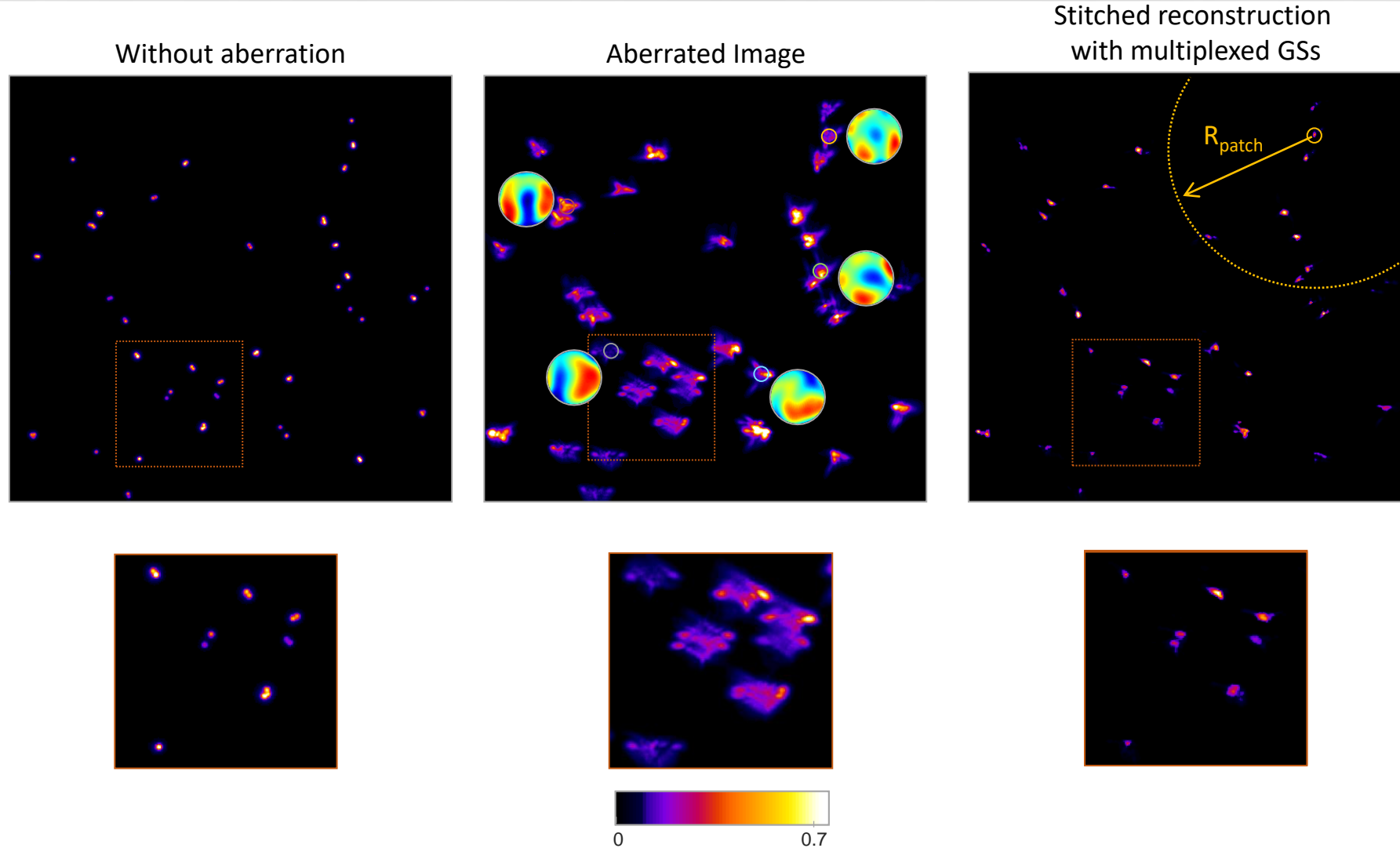
# Experimental setup



# Reconstructions stitching and extended FOV



# Reconstructions stitching and extended FOV



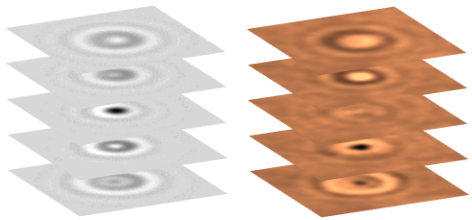
# Conclusion

## Wavefront Imaging with a thin diffuser

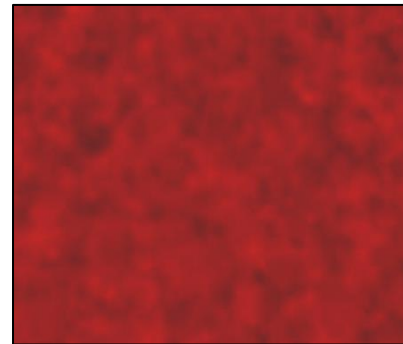
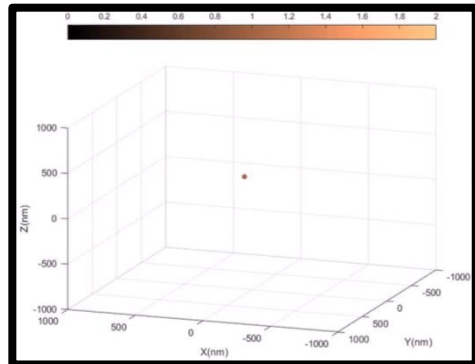
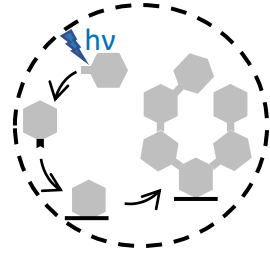
- **Broadband**
- **Imaging Capabilities:  $\sim 300 \times 300$  phase pixels**
- **Real-time: 45 fps reconstruction**
- **Sensitivity: 0.8nm OPD noise**

## Application in Microscopy

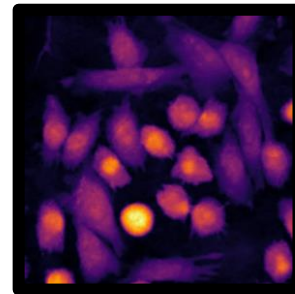
### 3D NP Superlocalisation



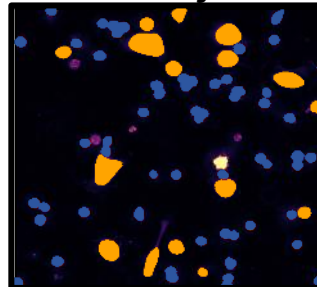
### Surface chemistry



### Label free cell monitoring

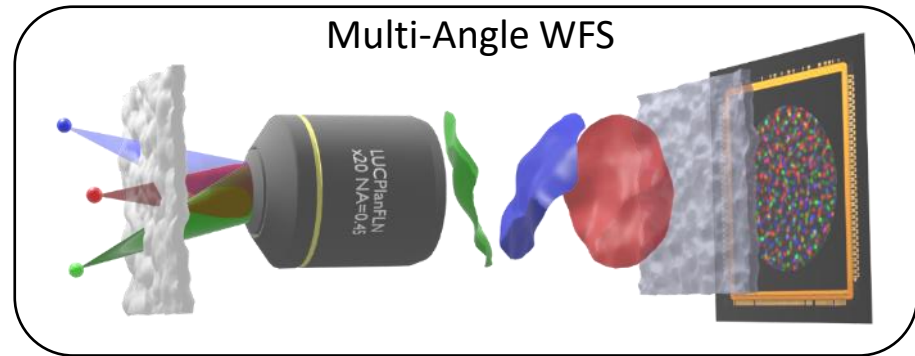


### Cell Identification

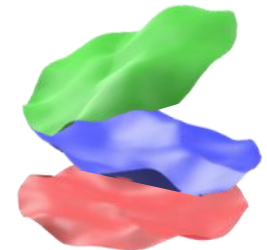


## Multiplexing Capabilities

### Multi-Angle WFS



### Multiplexed Wavefront





# Acknowledgment



G. Tessier



T. Wu



C. Gentner



A. Aggoun



B. Rogez



O. Goureau



S. Reichman



J. Brogard



M. Guillon



B. Blochet



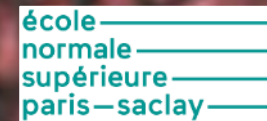
H. Rigneault



P. Bon



V. Brasiliense

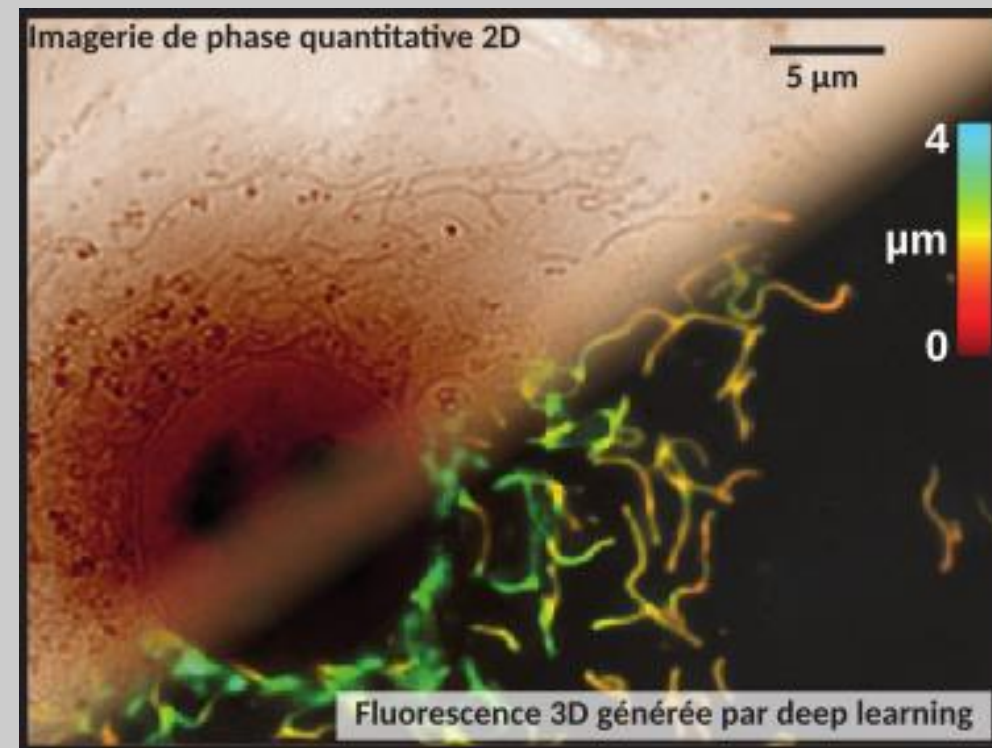


# Session 3: Biologie 2

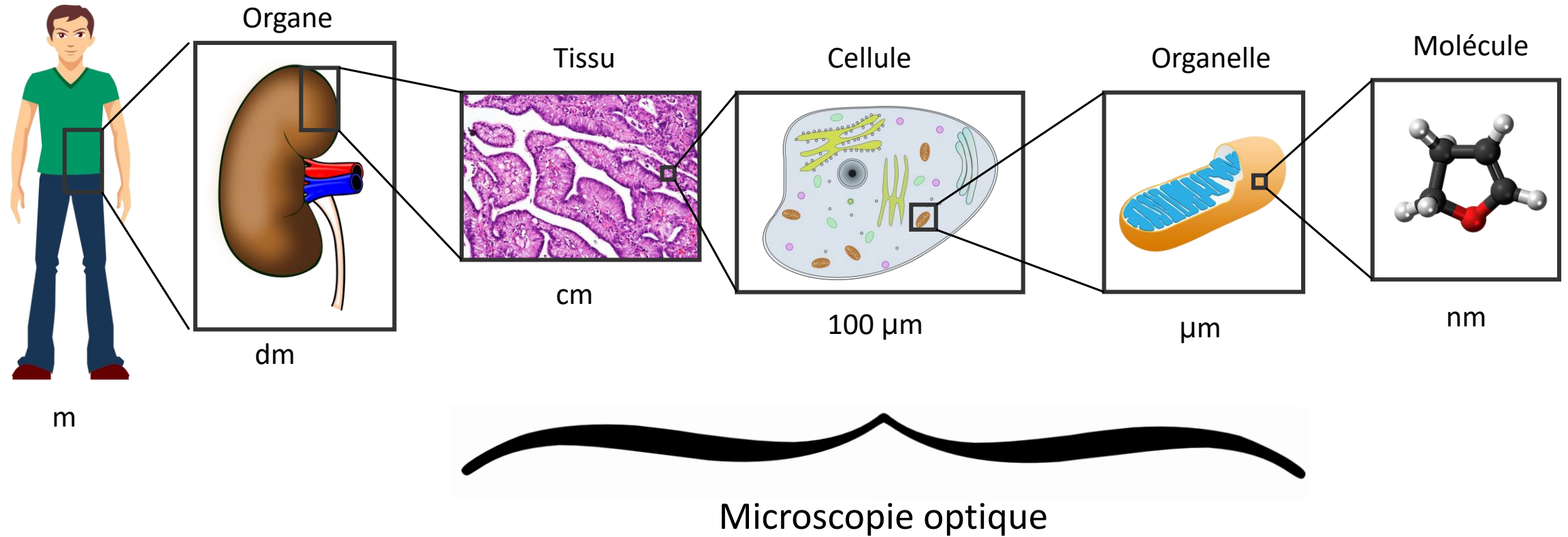
*Chairman : Pierre Bon*

- *Déchiffrer comment les cellules maintiennent une densité constante en utilisant des mesures simultanées de la masse sèche et du volume. **Mathieu Piel**, Institut Curie*
- *IDML aléatoire avec un diffuseur mince : application en microscopie. **Pascal Berto**, Institut de la Vision*
- *Apprentissage profond sur les valeurs complexes du champ électromagnétique appliqué à l'imagerie quantitative de phase. **Guillaume Maucort**, Institut d'Optique*

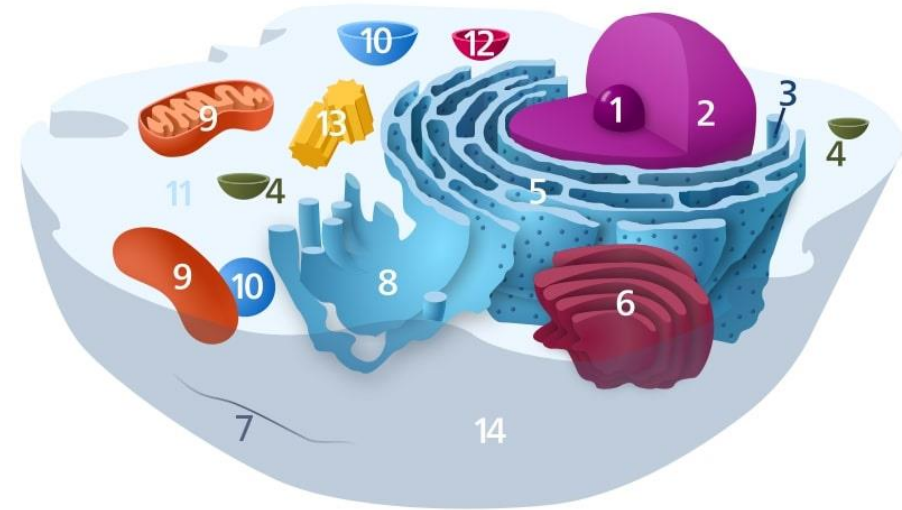
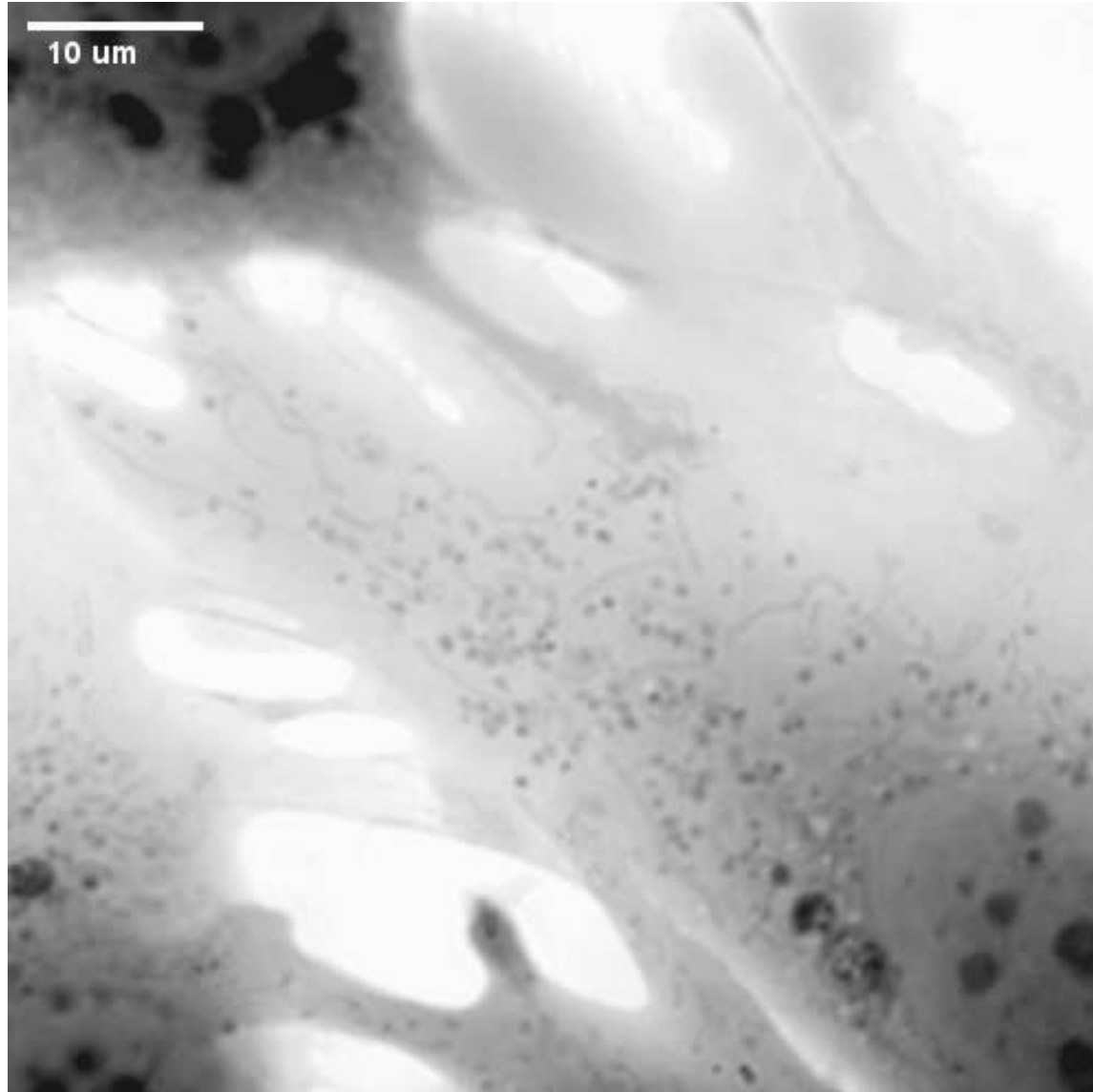
**Apprentissage machine pour l'imagerie  
microscopique quantitative sans  
marquage.  
Applications à l'imagerie biomédicale.**



# Observation du vivant



# Biologie cellulaire



**Eléments semi-transparents**

**Nombreux éléments dynamiques**

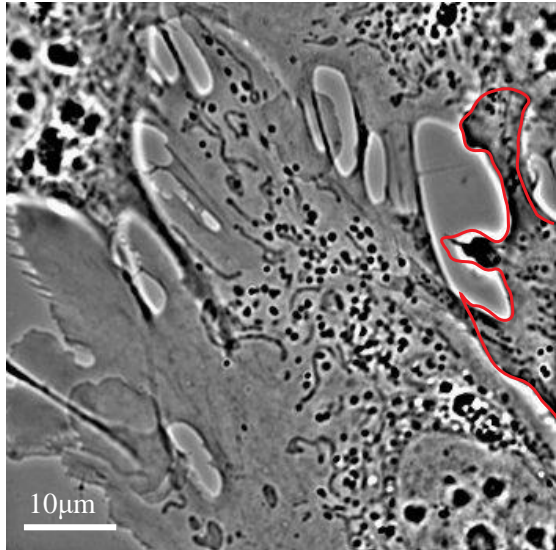
**Etude des mitochondries**

**Maladie de Huntington**

**Maladie de Charcot**

# Problématique

## Microscopie sans marquage



Résolution ~200nm

Éclairage  
W/cm<sup>2</sup>

Acquisition longue  
Acquisition rapide

Contraste  
aspécifique

Échantillon non modifié

Mesure quantitative  
intrinsèque

## Microscopie de fluorescence

Résolution ~200nm

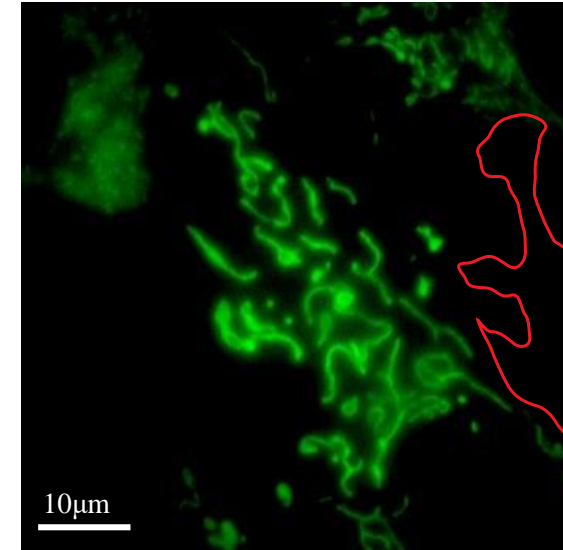
Source intense  
kW/cm<sup>2</sup>

Durée limitée  
Fréquence limitée

Spécificité  
moléculaire

Marquage

Mesure qualitative  
avec artefacts



Combiner les avantages des deux modalités

# *Plan de la présentation*

**Introduction**

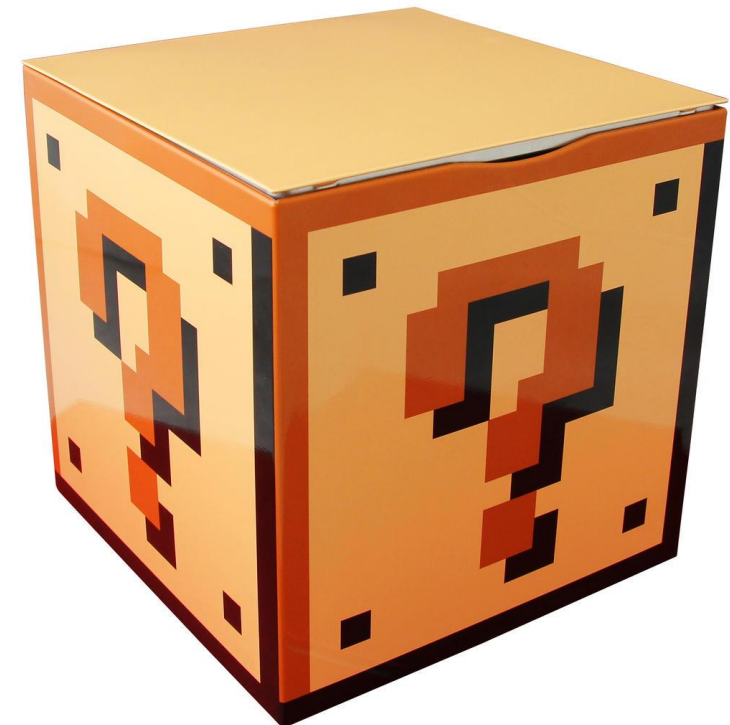
**Modèle pré-existant**

**Données complexes**

**Evolution 3D**

**3D artificielle**

**Ouverture**



# Apprentissage supervisé

## MNIST

### Entraînement

Prédiction



label = 5



label = 0



label = 4



label = 1



label = 9



label = 2



label = 1



label = 3



label = 1



label = 4



label = 3



label = 5



label = 3



label = 6



label = 1



label = 7



label = 2



label = 8



label = 6



label = 9





# Algorithme de départ

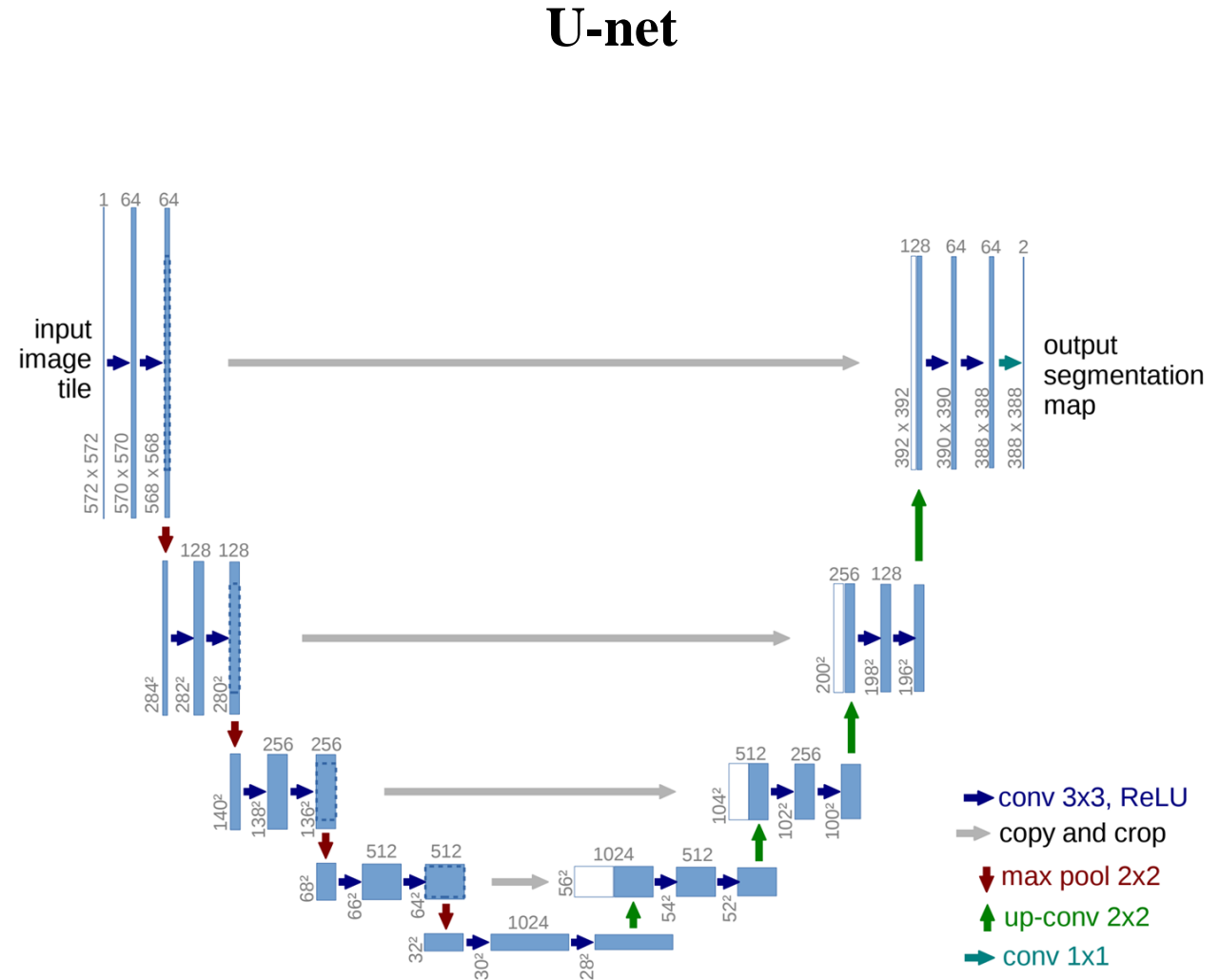
Adaptation de style

Réseau de neurones convolutifs

Modèles récurrents

Modèles résiduels

Inception



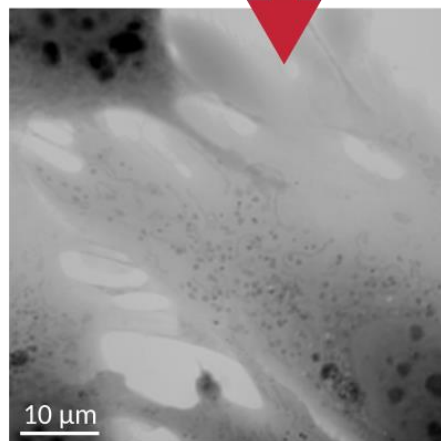
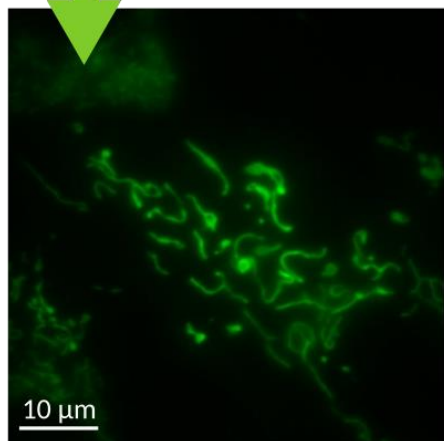
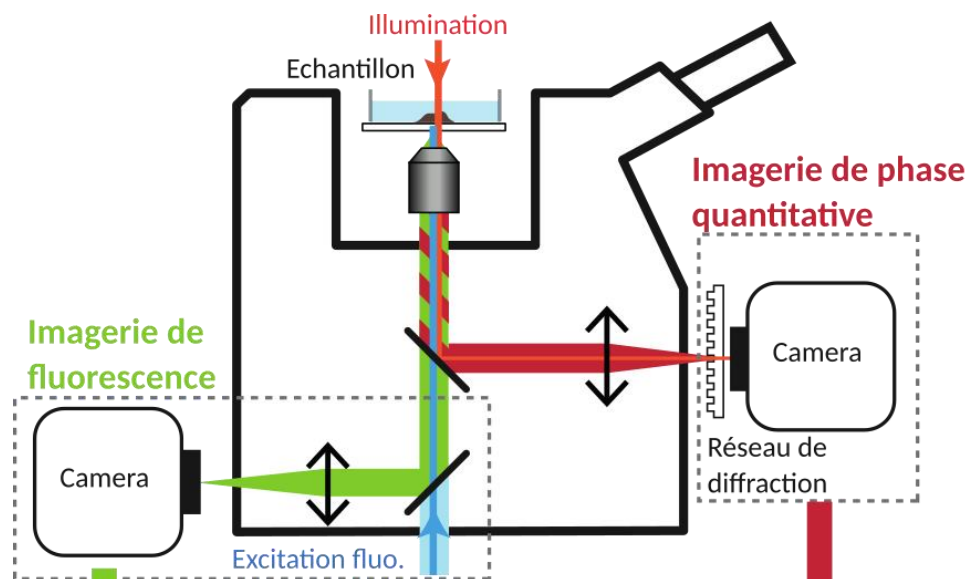
He & al. 2015

Lu & al. 2020

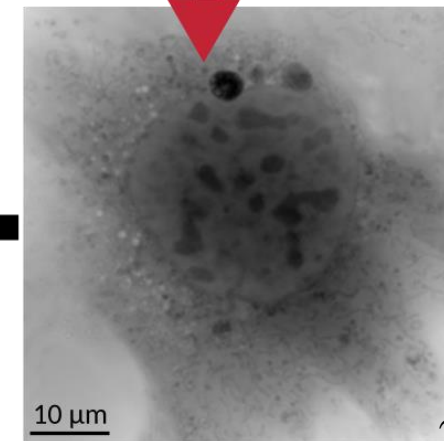
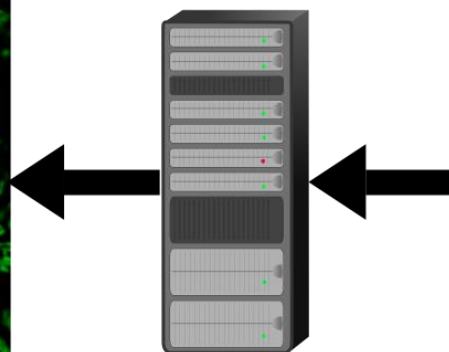
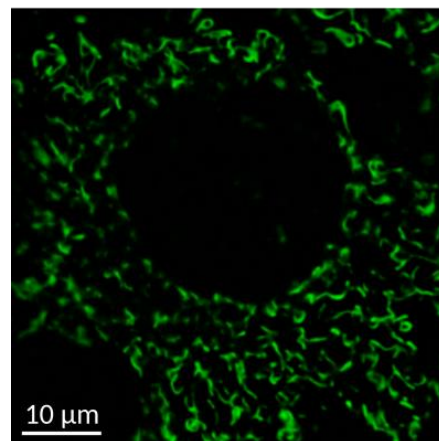
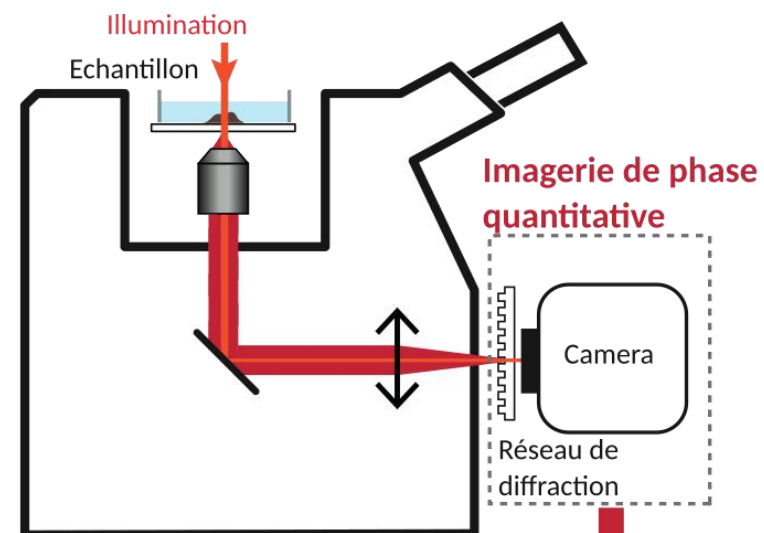
Ronneberger & al. 2015

# Acquisition des données

## Apprentissage supervisé

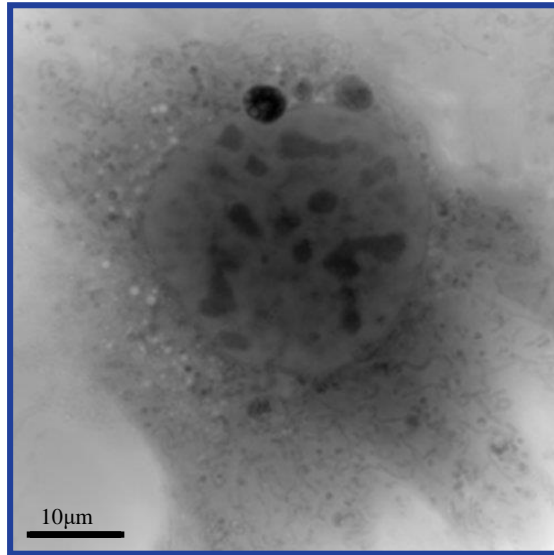


## Prédiction

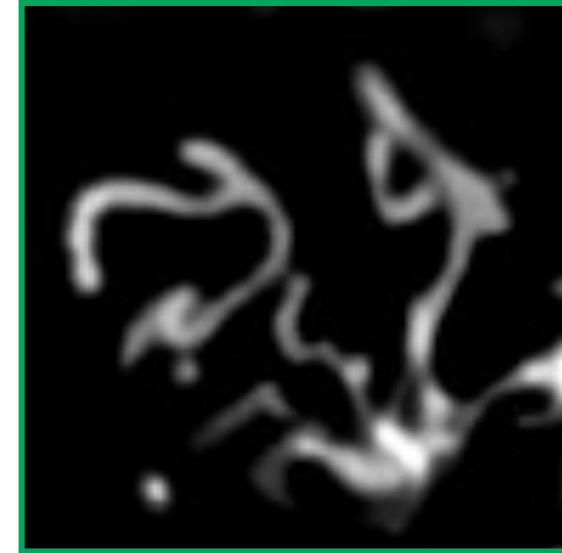
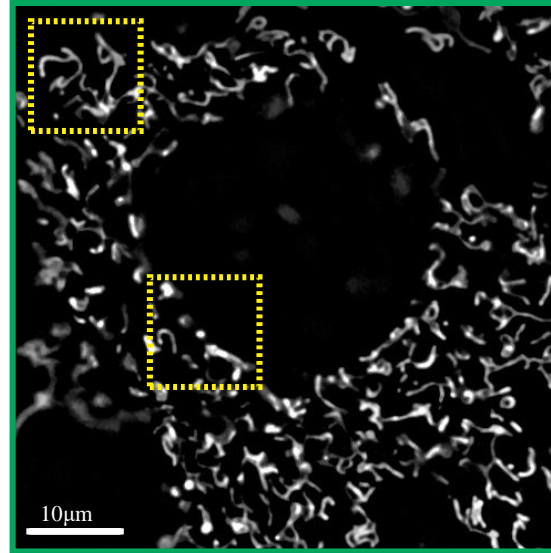


# *Application initiale*

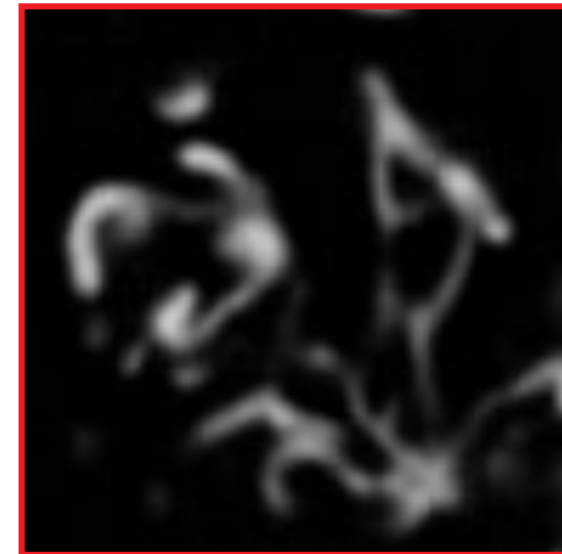
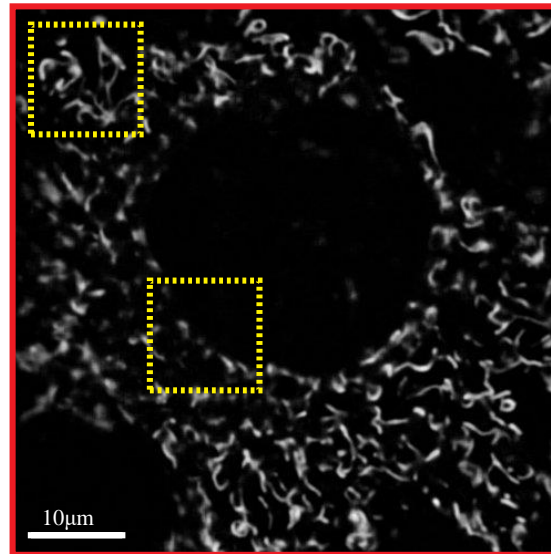
Phase



Fluo. réelle

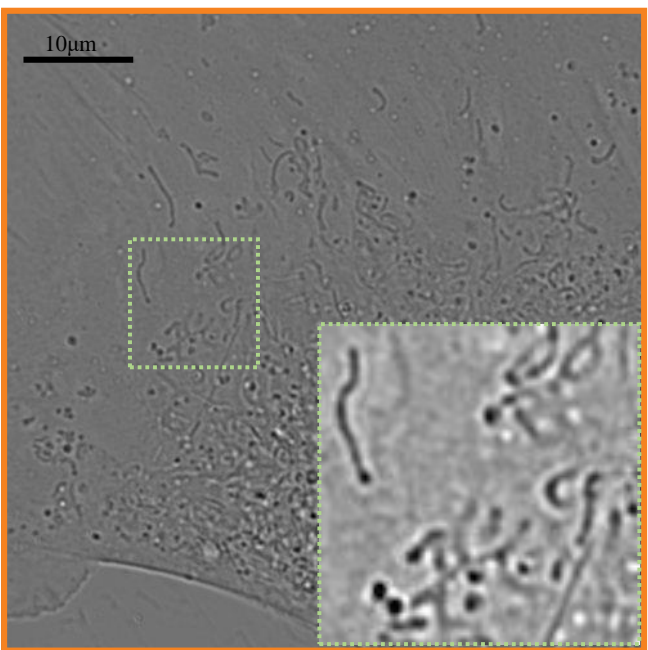


Prédiction





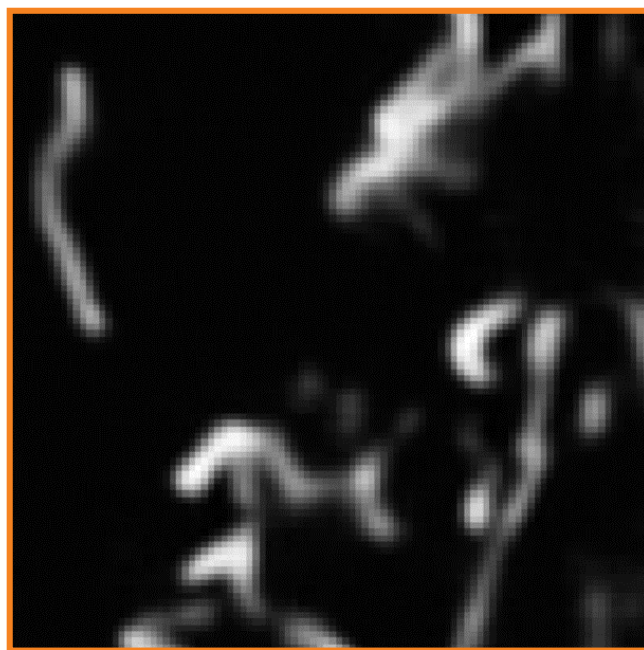
Intensité



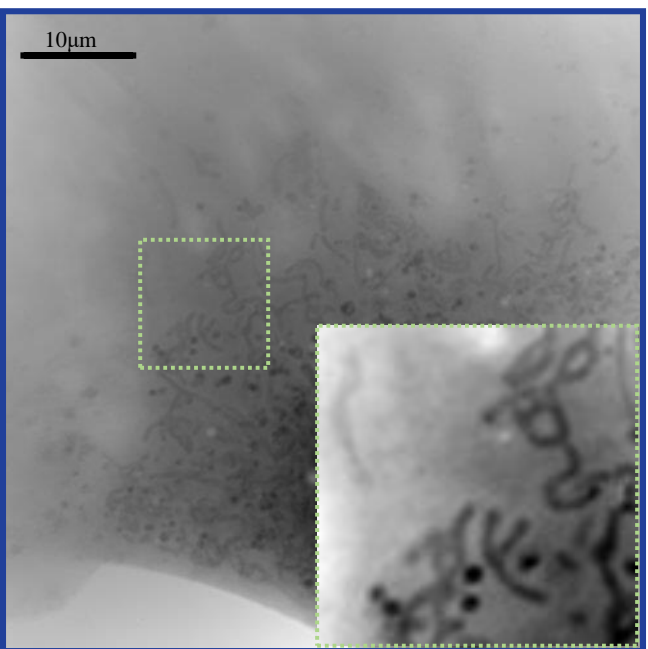
Fluo. Réelle



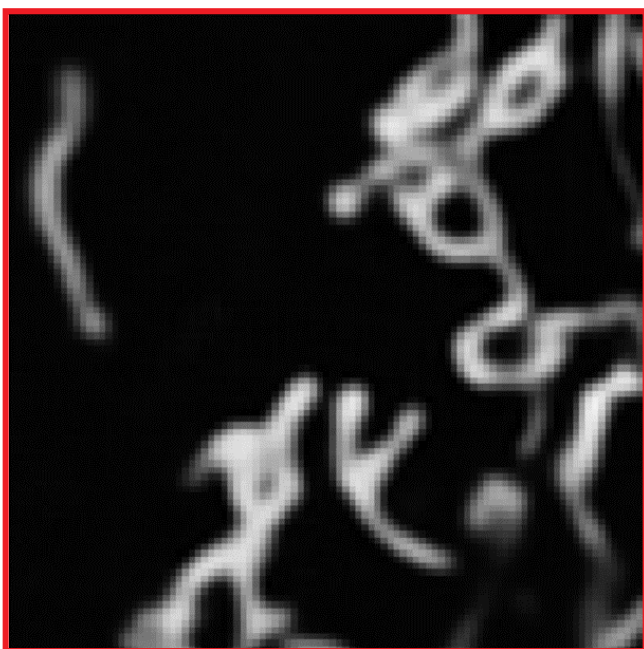
Pred. Int.



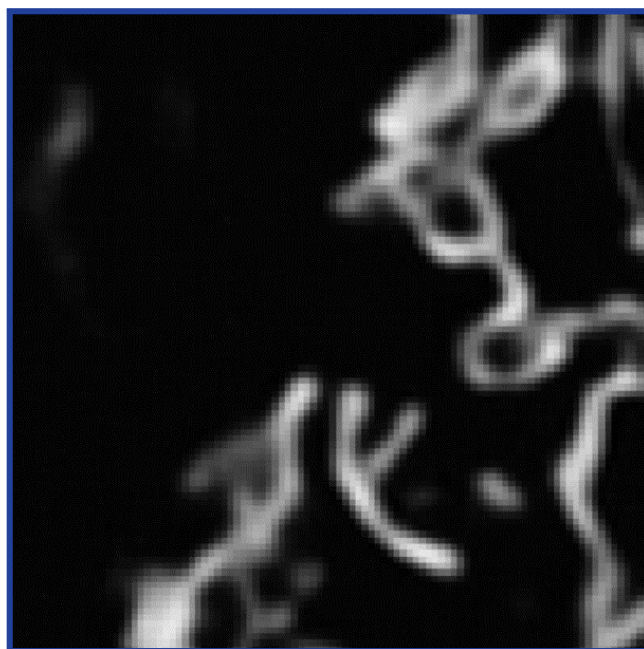
Phase



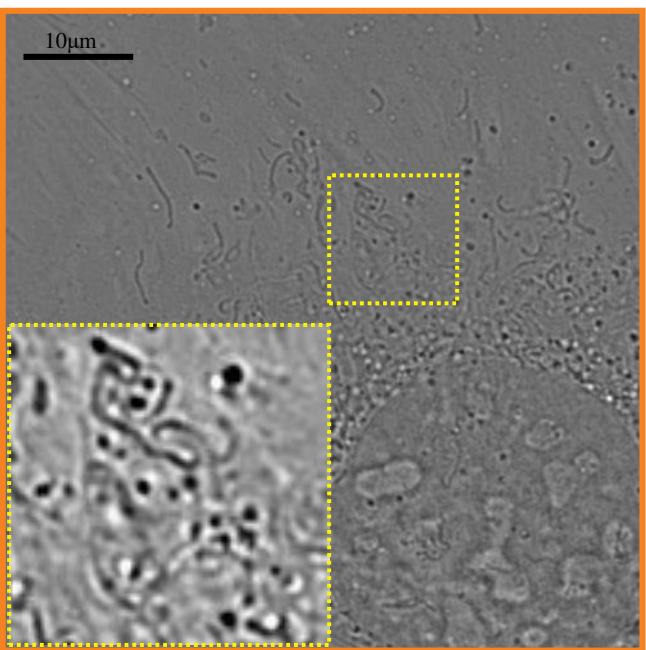
Pred. Complexe



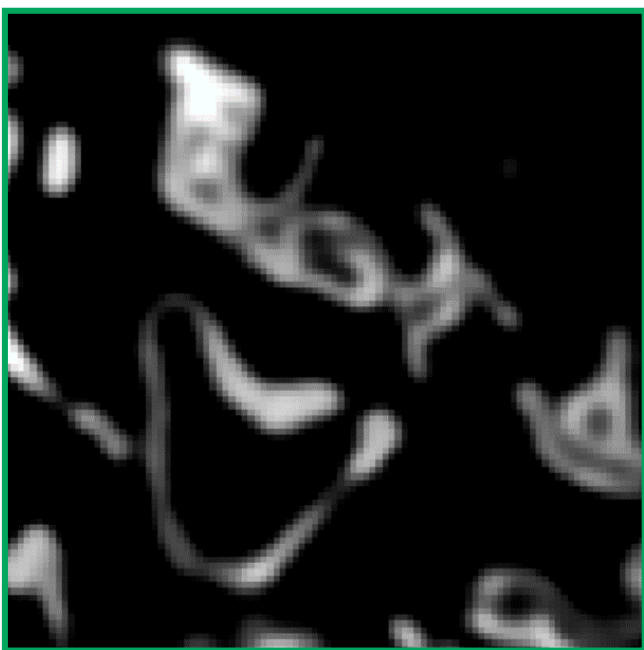
Pred. Phase



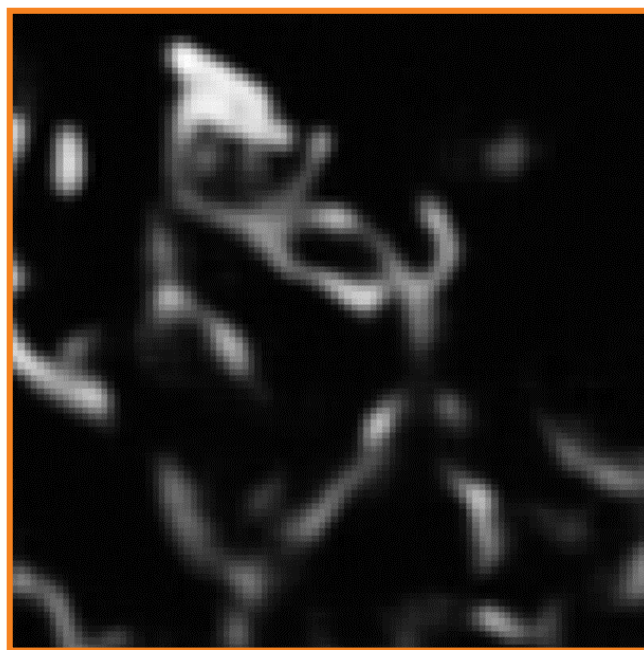
Intensité



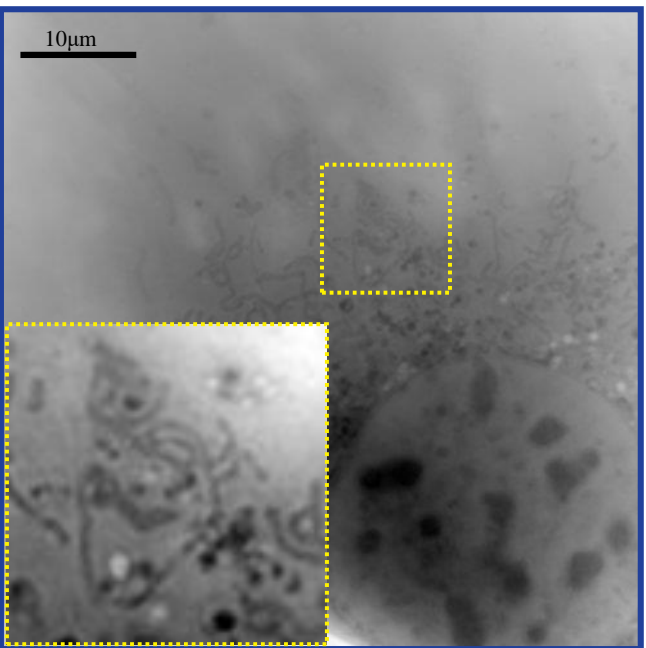
Fluo. Réelle



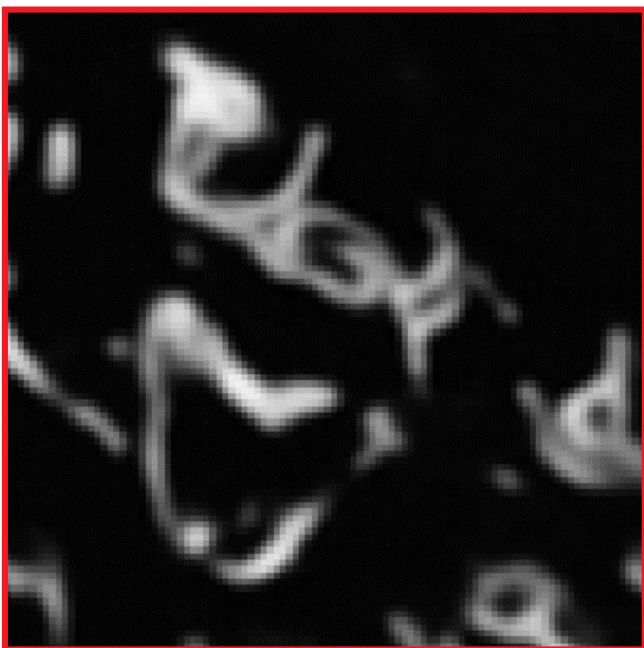
Pred. Int.



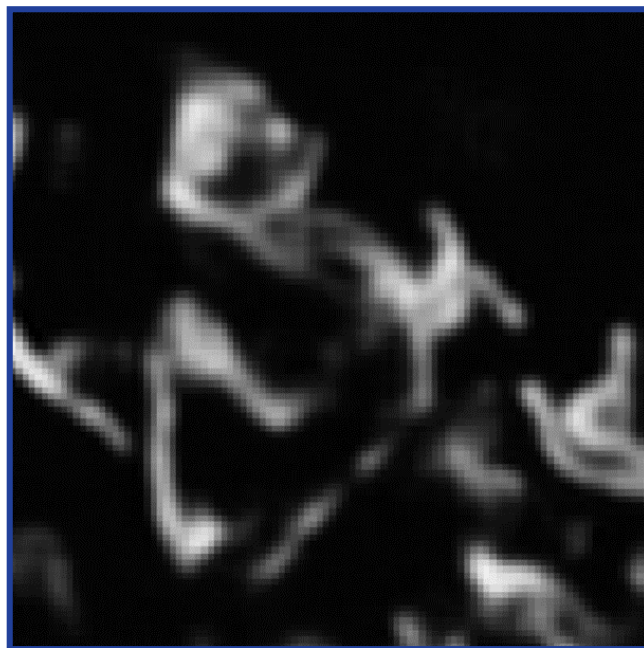
Phase



Pred. Complexe



Pred. Phase



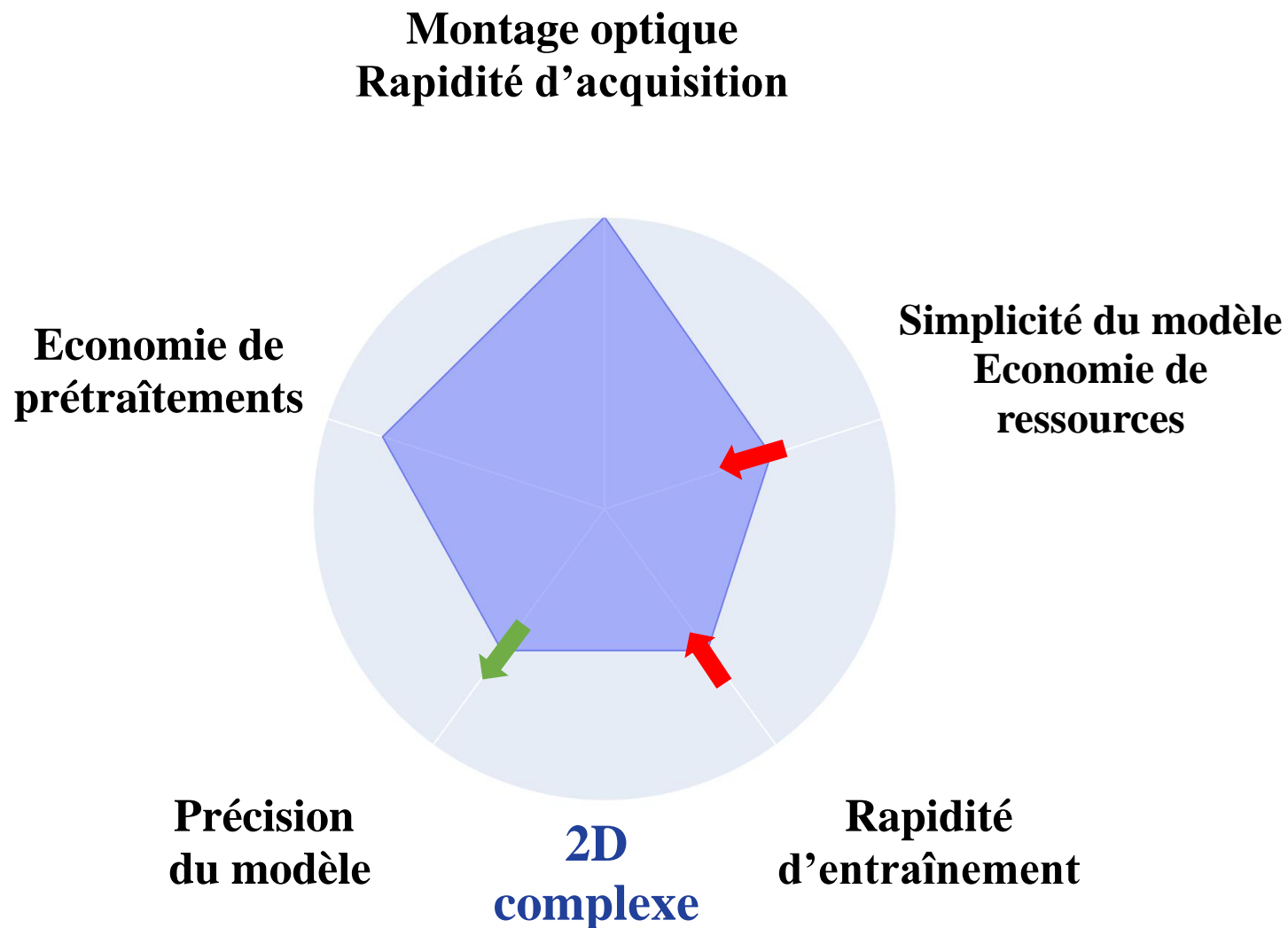
# Première évolution

**Amélioration de la  
qualité de prédiction**

**Complémentarité  
des signaux**

**Modèle plus lourd**

**Difficulté dans les zones  
chargées**



# *Champ électromagnétique 3D*

**Z = -500nm**

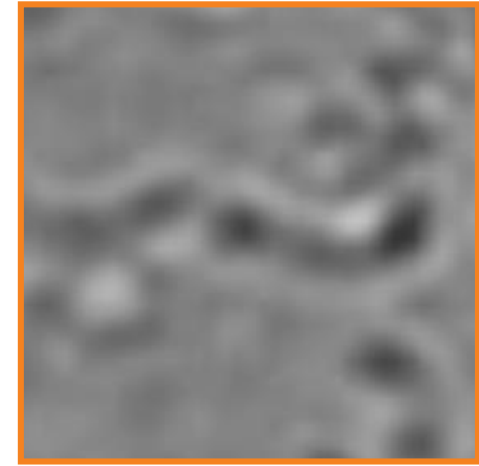
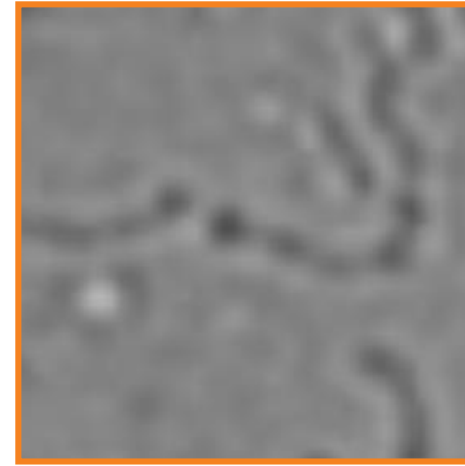
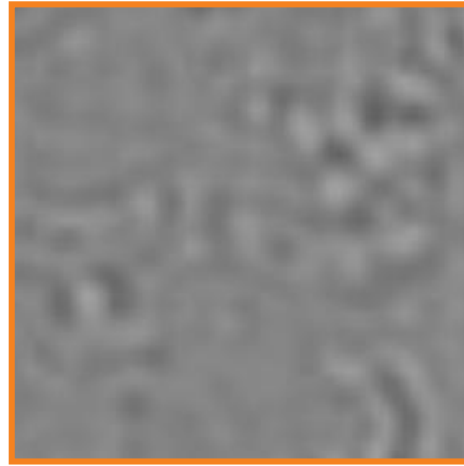
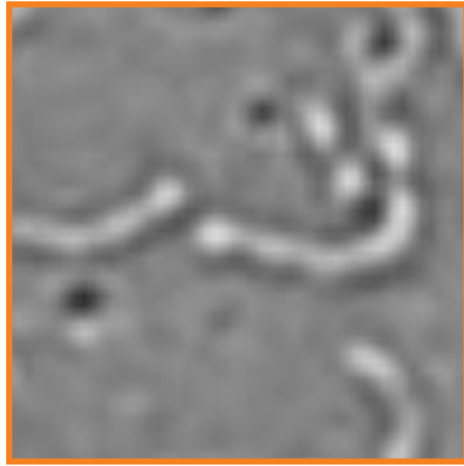
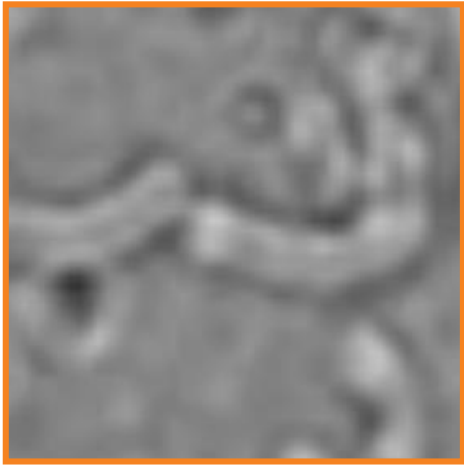
**Z = -250nm**

**Z = 0**

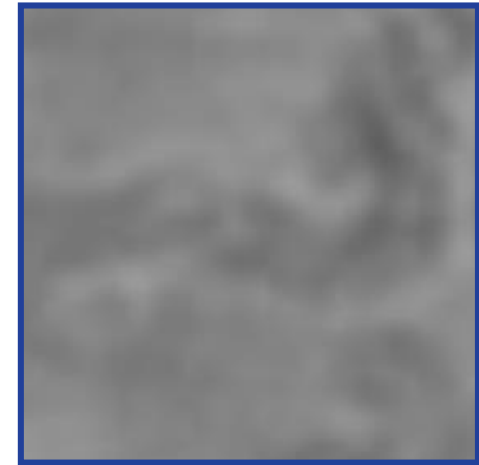
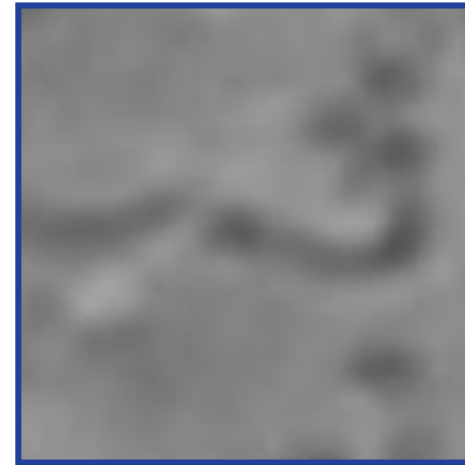
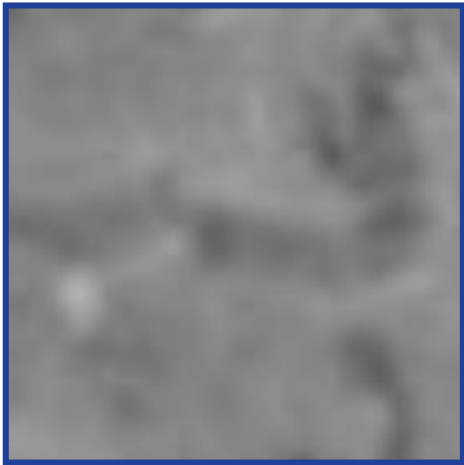
**Z = +250nm**

**Z = +500nm**

**INTENSITE**



**PHASE**

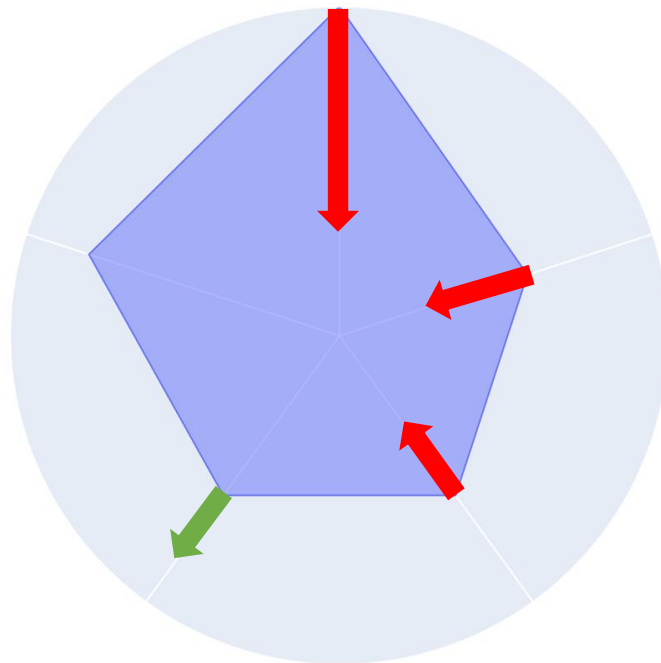




# Modèle 3D

Montage optique  
Rapidité d'acquisition

Economie de  
prétraitements



Simplicité du modèle  
Economie de  
ressources

Précision  
du modèle

2D → 3D

Rapidité  
d'entraînement

Fréquence d'acquisition

3Hz → 0.15Hz

Nombre de paramètres entraînaibles

12M → 50M

Modèle

4 étages → 3 étages

Taille d'images réduites

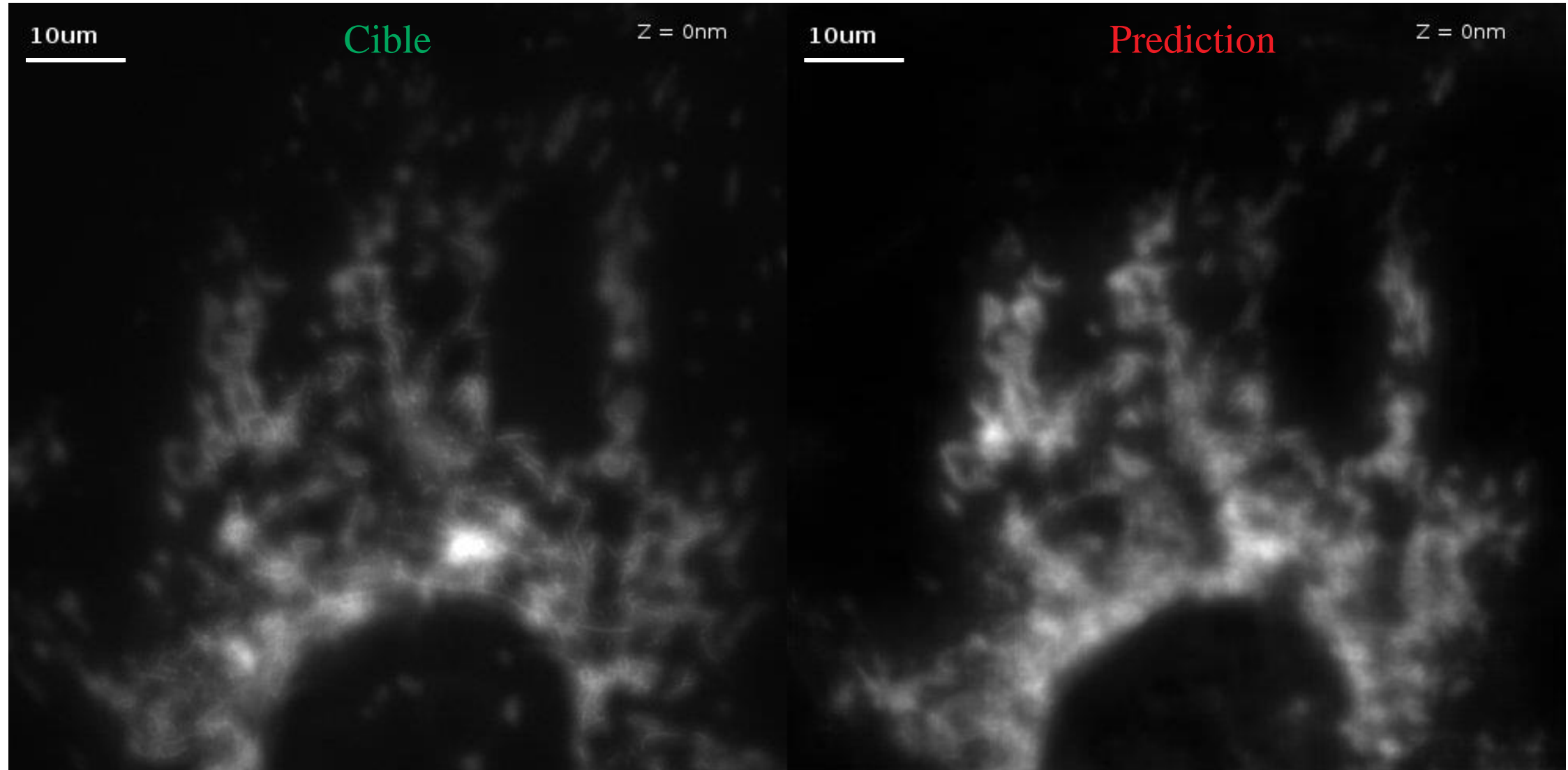
Carte graphique

11Go → 24Go

Durée d'entraînement

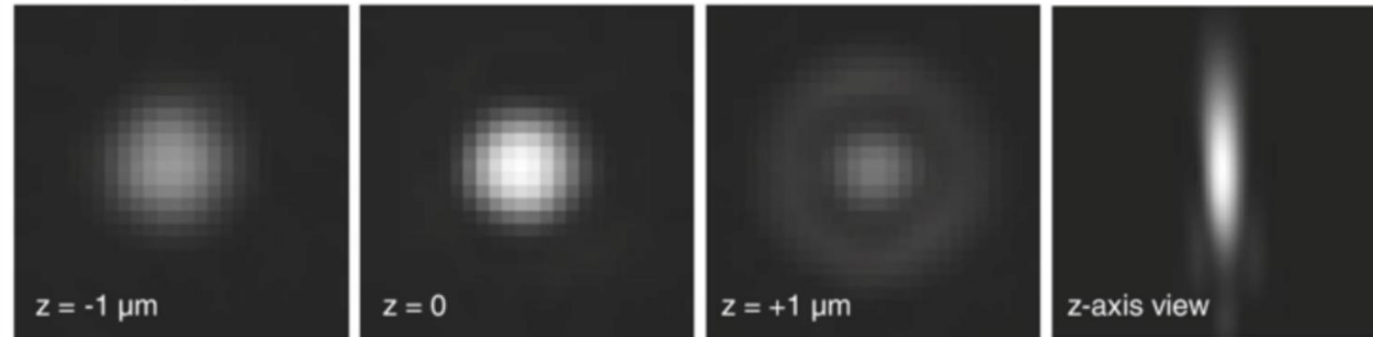
3h → 60h

# Résultats 3D

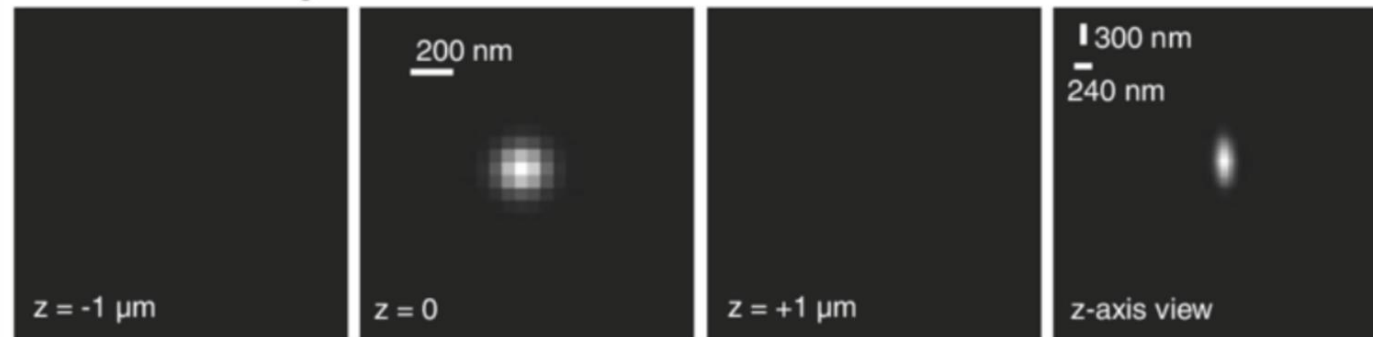


# Déconvolution

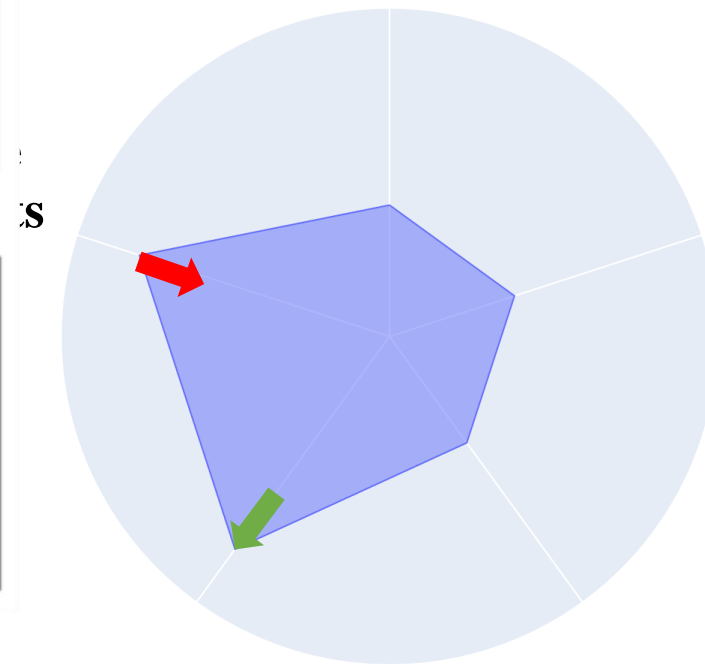
**a** Raw image



**b** Deconvolved image



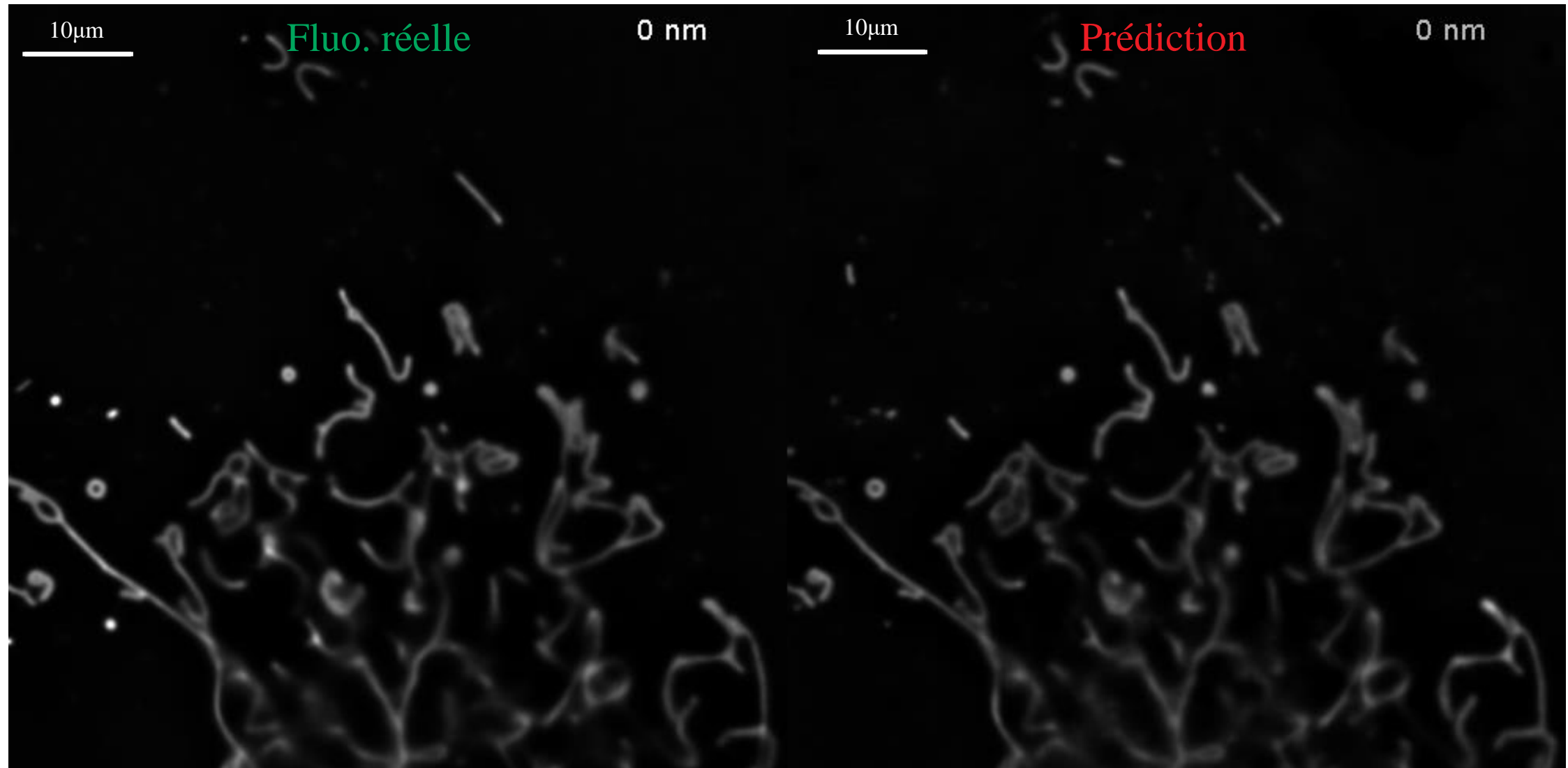
**Montage optique**  
**Rapidité d'acquisition**



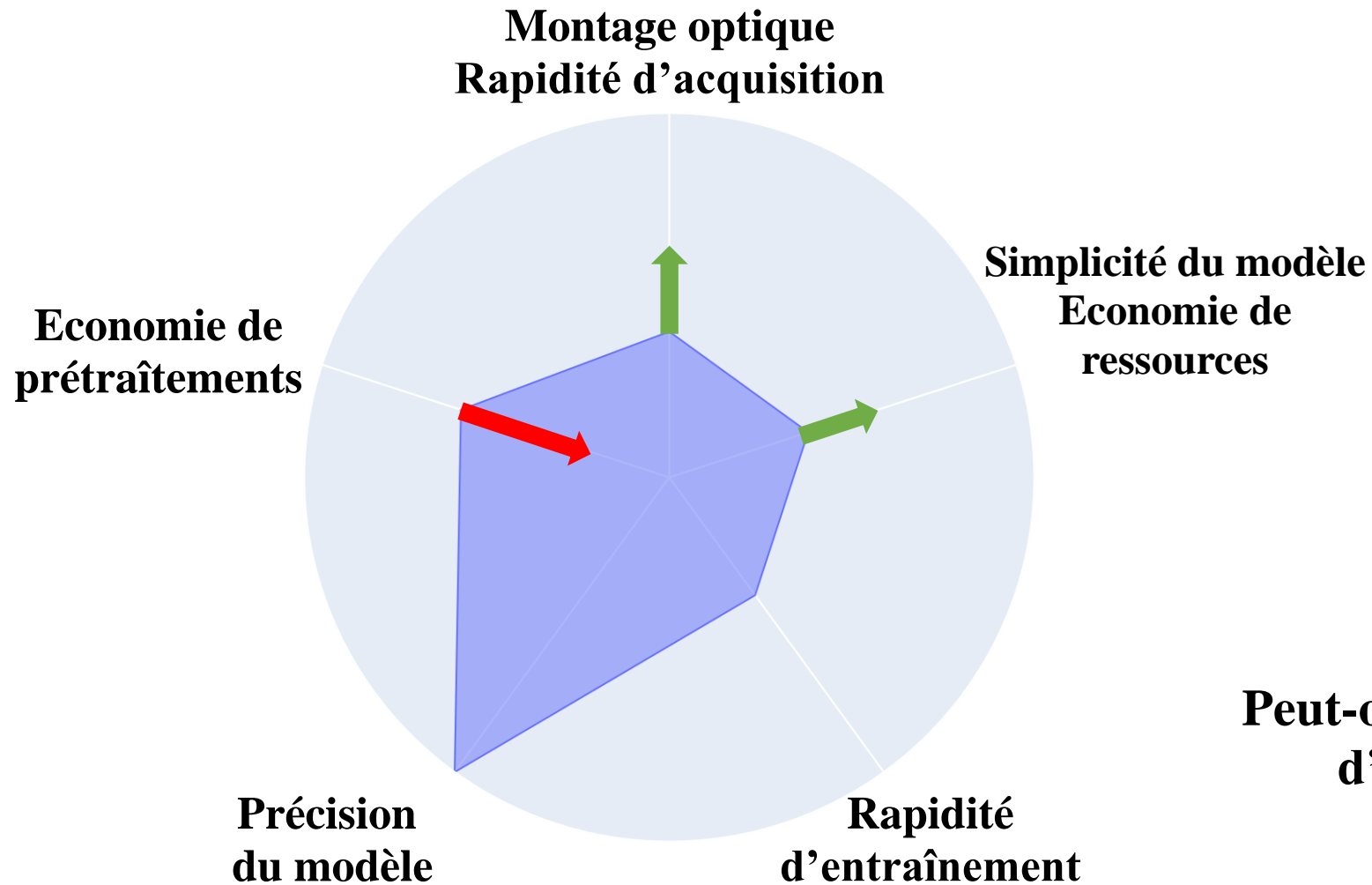
**Précision  
du modèle**

**Rapidité  
d'entraînement**

# *Resultats fluorescence déconvoluée*



# Critique



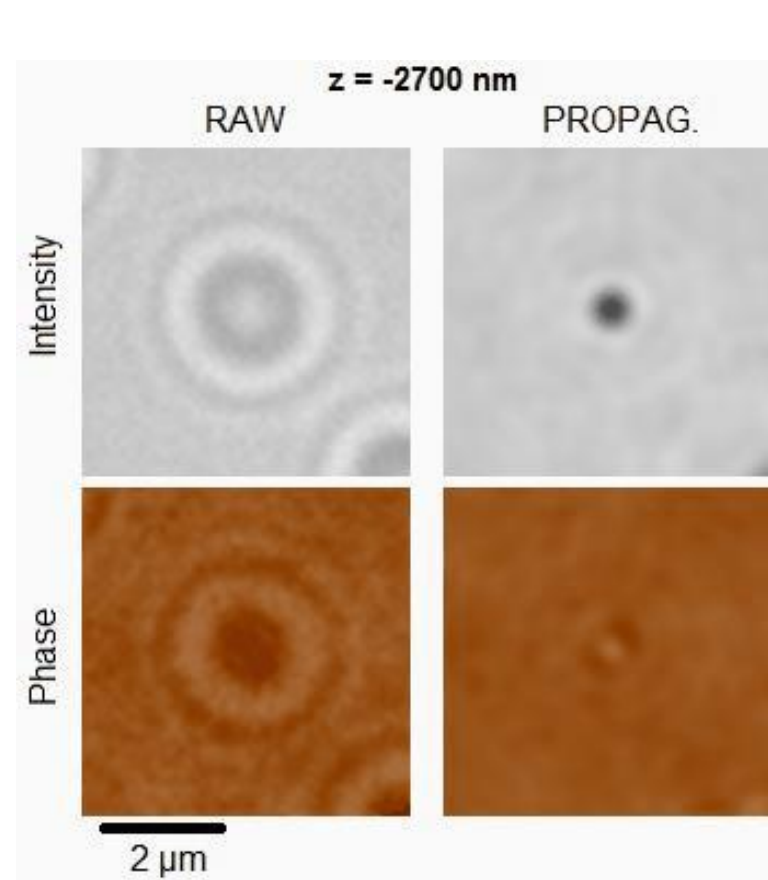
**Fonctionnement optimisé  
pour la précision**

**Acquisition d'une pile  
d'images : 10 secondes**

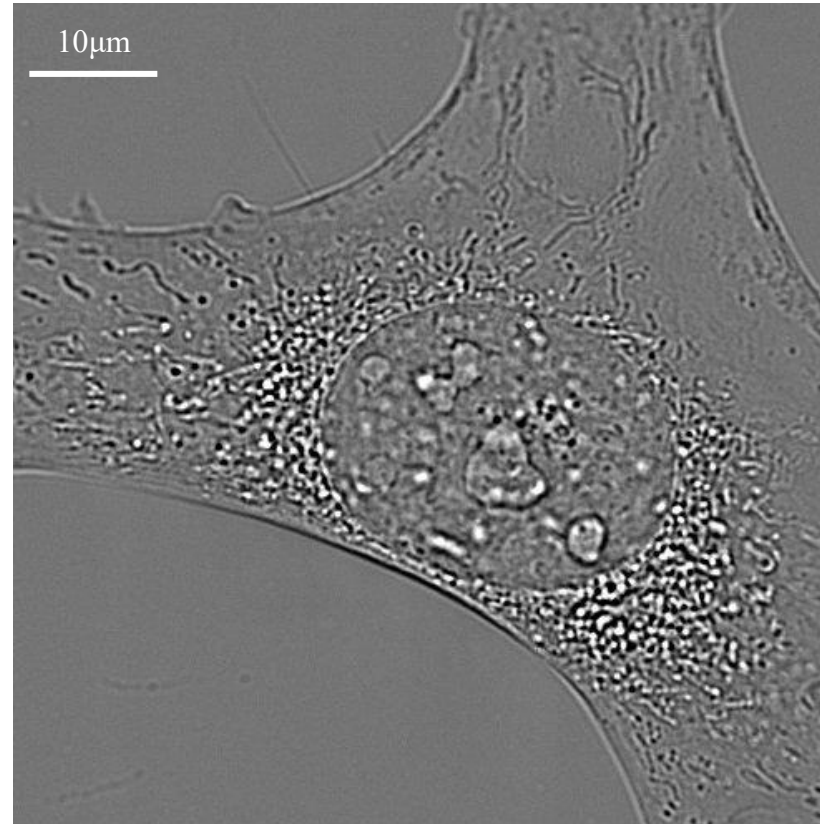
**Gros besoins en  
capacité de calcul**

**Peut-on diminuer la complexité et le temps  
d'acquisition en transférant sur le  
prétraînement?**

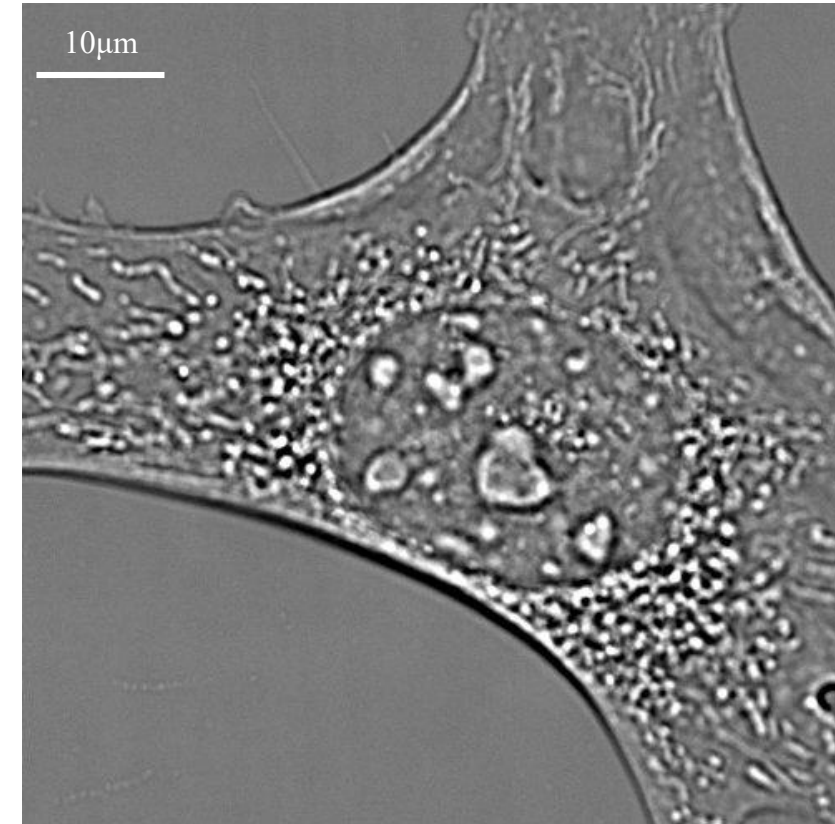
# *Propagation numérique*



**Z = 0**



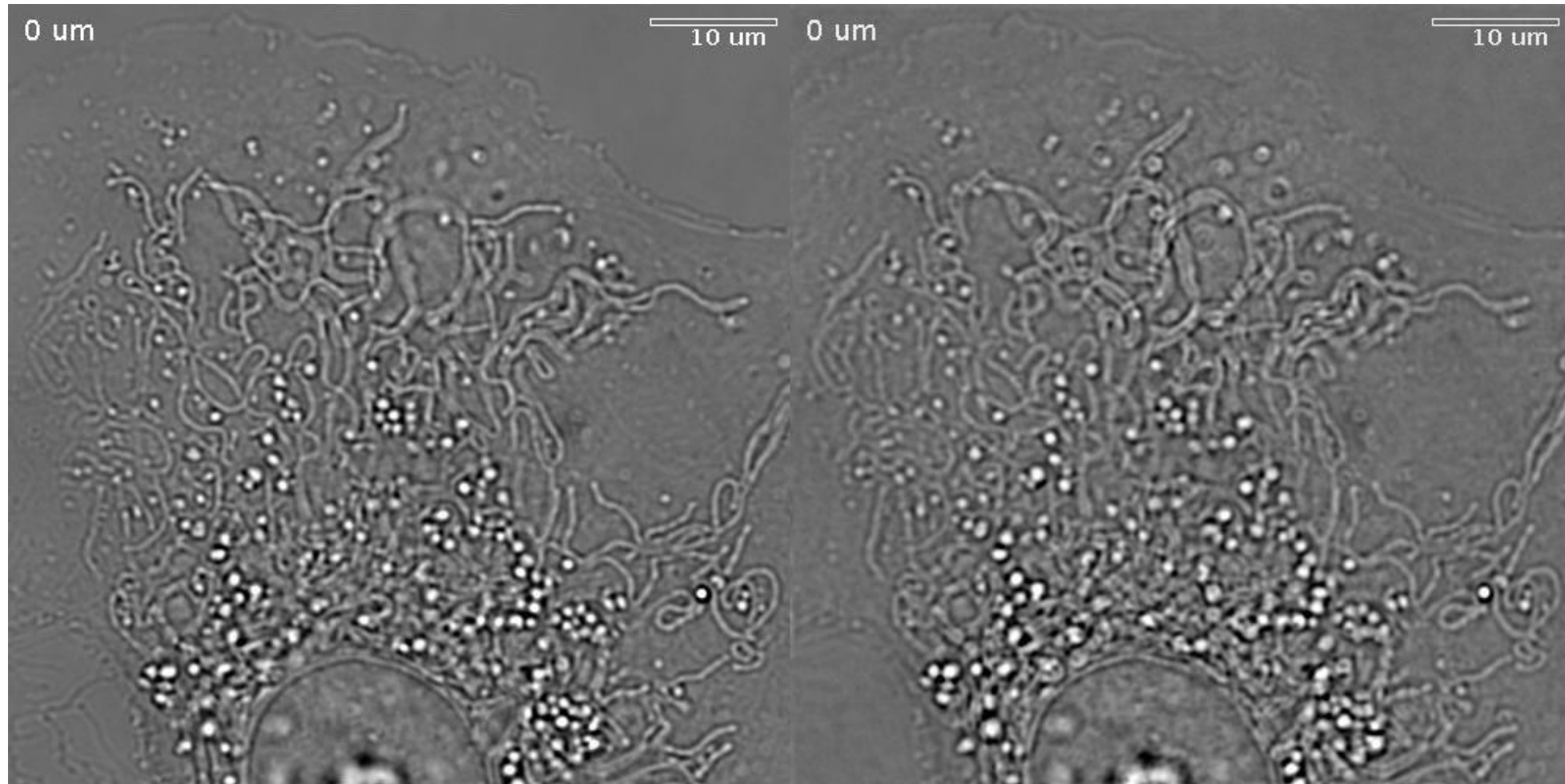
**Z = -5000 nm**



# *Application*

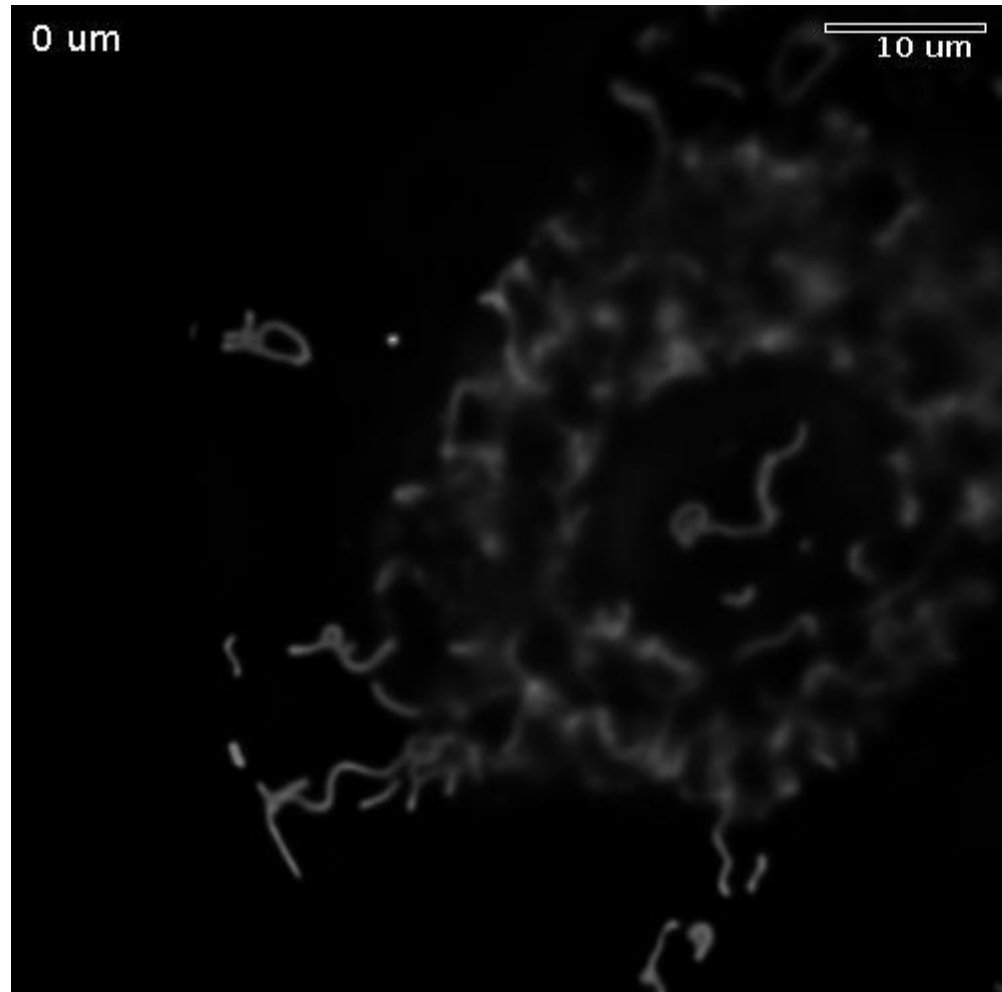
## Acquisition

## Propagation

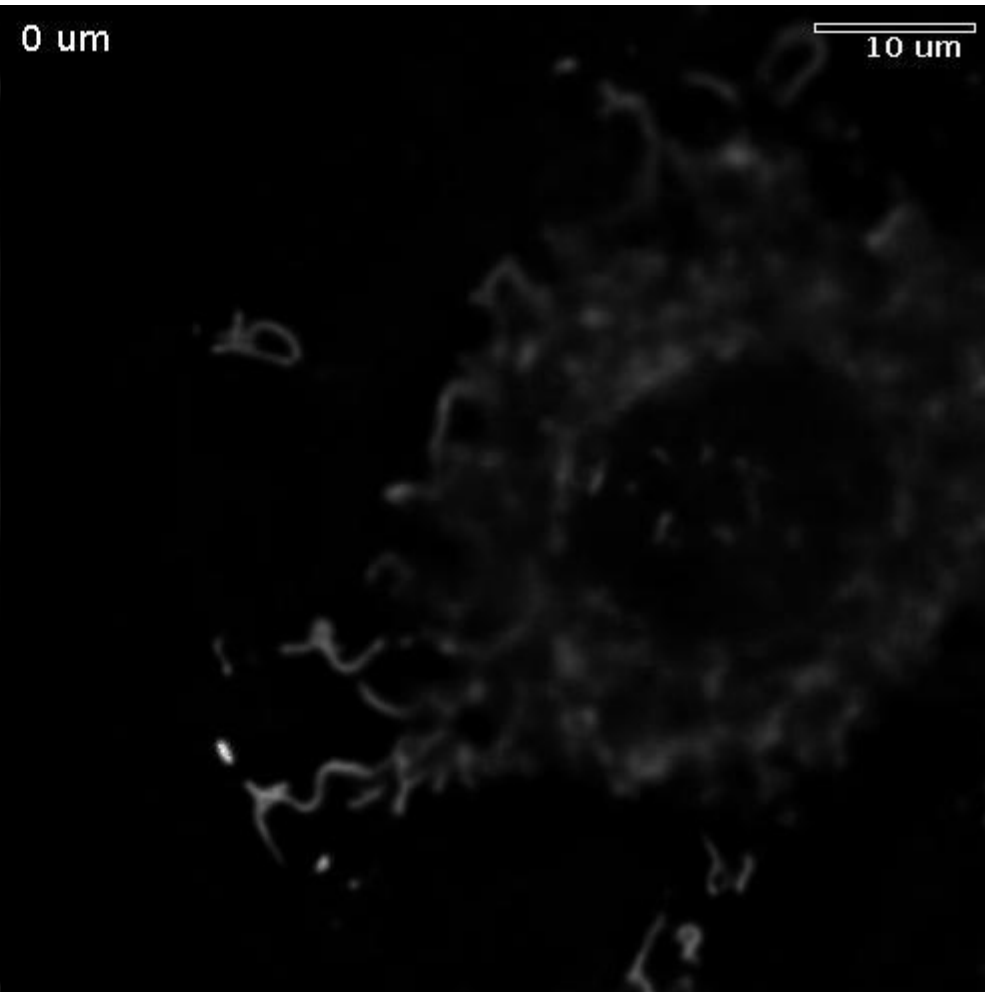


# Resultats

## Fluorescence réelle

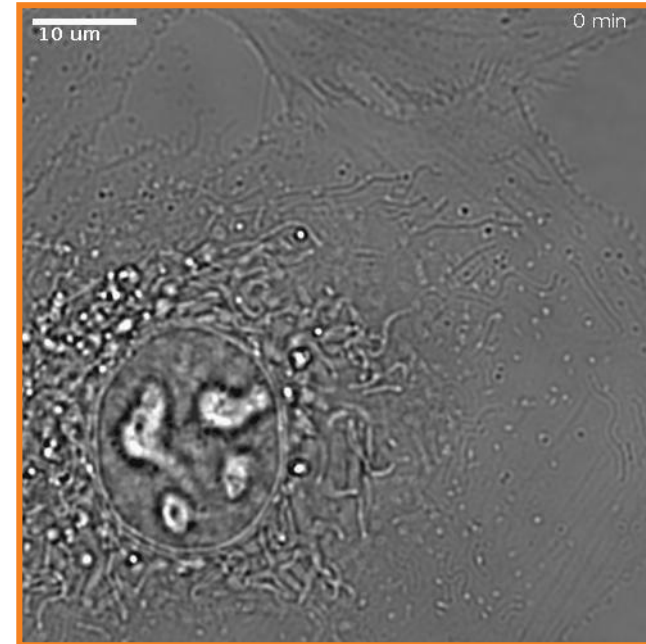
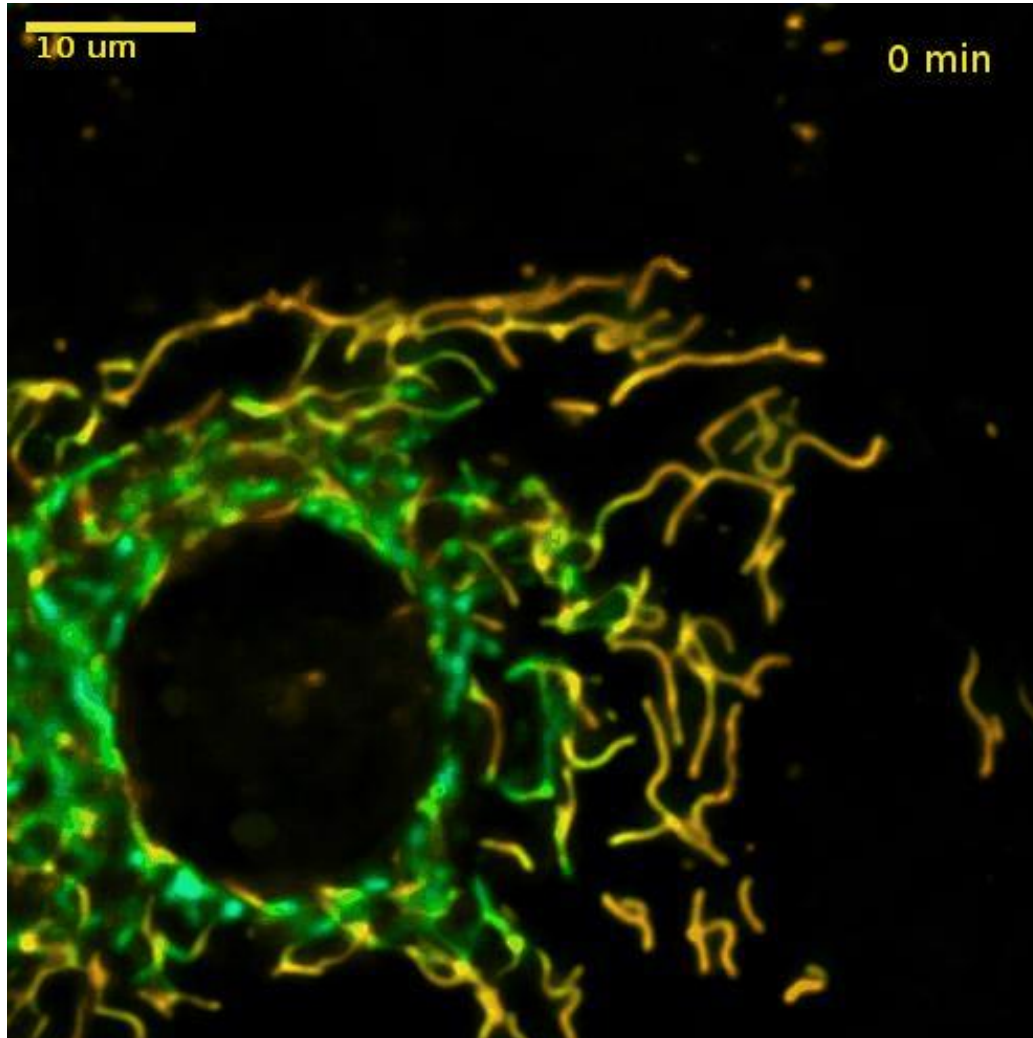
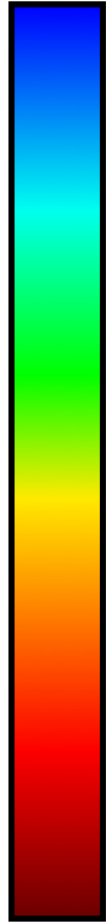


## Prédiction

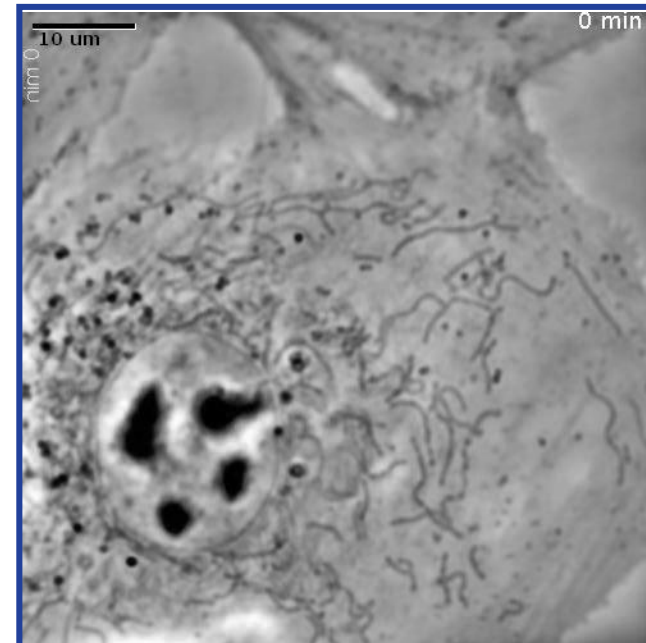




# Resultats temporels

 $z=+3\mu\text{m}$ 

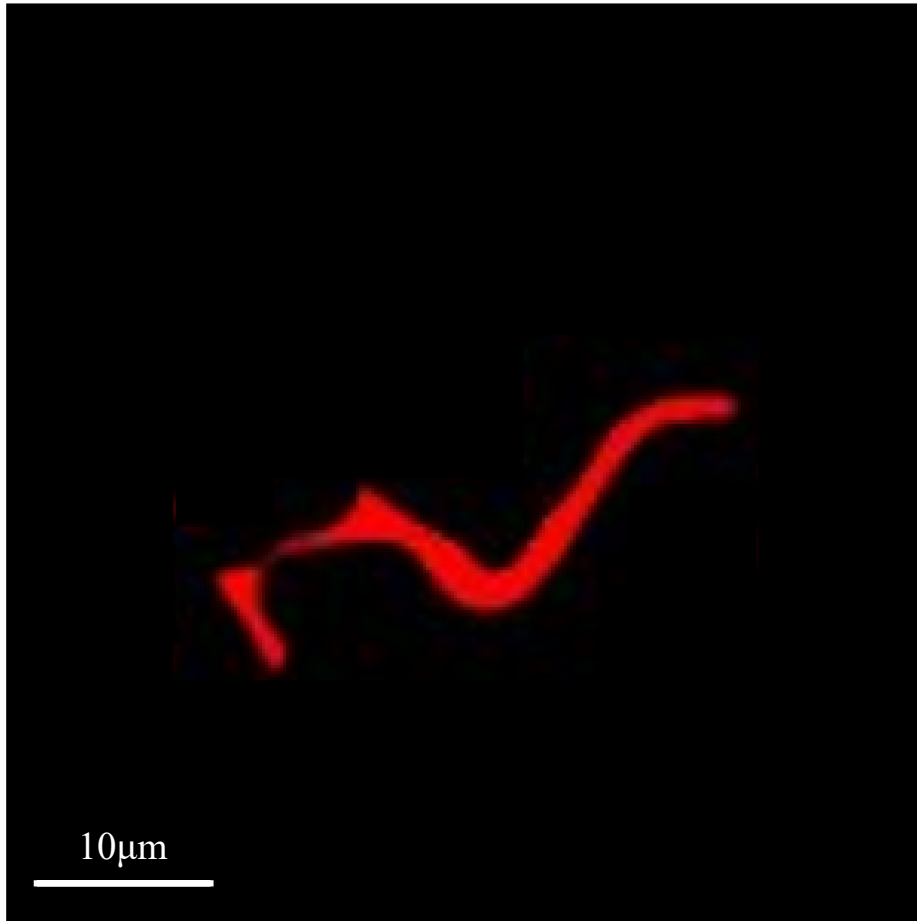
Intensité  
 $z = 2\mu\text{m}$



Phase  
filtrée  
 $z = 2\mu\text{m}$

# *Extraction d'informations*

Mitochondrie  
Prédiction  
individuelle



**Extraction automatique  
des données**

**Analyses morphologiques**

Taille

Courbure

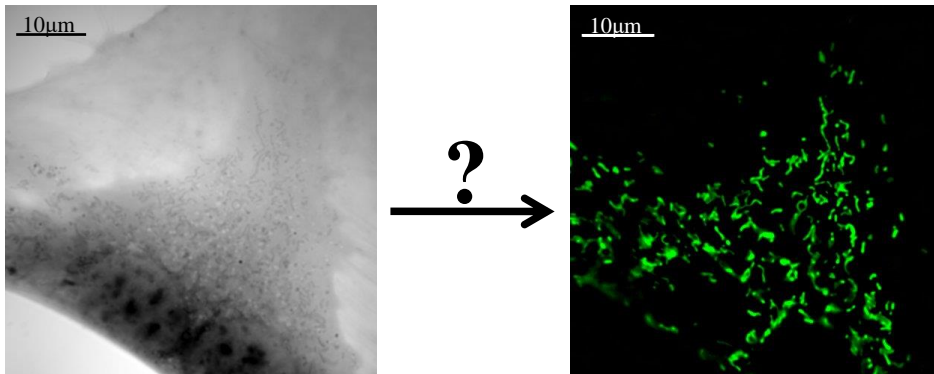
Mouvement

...

**Intéractions**

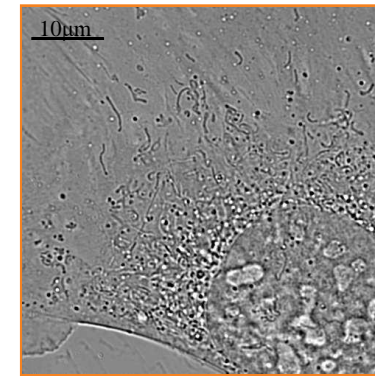
# Conclusion scientifique

Volonté d'utiliser la microscopie quantitative de phase pour des tâches de segmentation

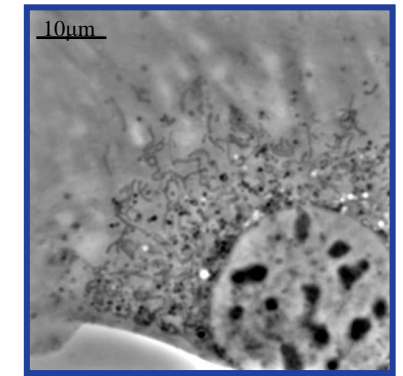


Prise en compte de données complexe en entrée

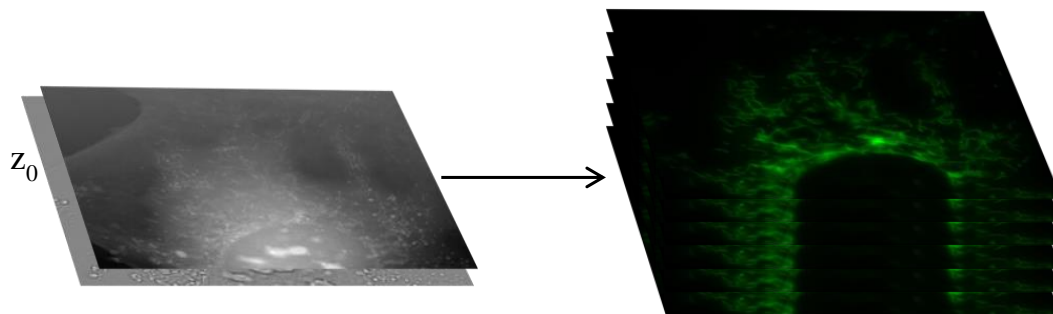
Intensité



Phase (filtrée)

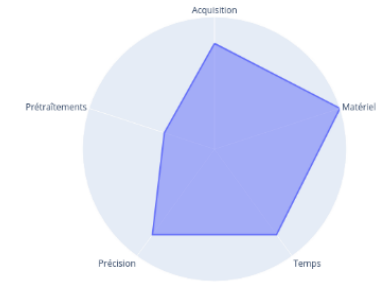
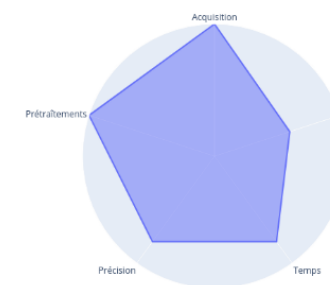


Prédiction de fluorescence en 3D à partir d'une acquisition 2D



$z_0 + 1.5\mu\text{m}$   
 $z_0 + 1\mu\text{m}$   
 $z_0 + 0.5\mu\text{m}$   
 $z_0$   
 $z_0 - 0.5\mu\text{m}$   
 $z_0 - 1\mu\text{m}$

Multiples modèles proposés



# Remerciements



**Pierre Bon**

**Alberto Aguilar**  
**Minh-Chau Nguyen**  
**Adeline Boyreau**  
**Peter Bonneau**



**Laurent Cognet**  
*Nanobiomicroscopy*

**Etienne Gaufrès**



**Arnaud Mourier**  
*Bioenergetics and dynamics of mitochondria*

**Manuel Rojo**  
**Claudine David**



10µm

Fluo. réelle

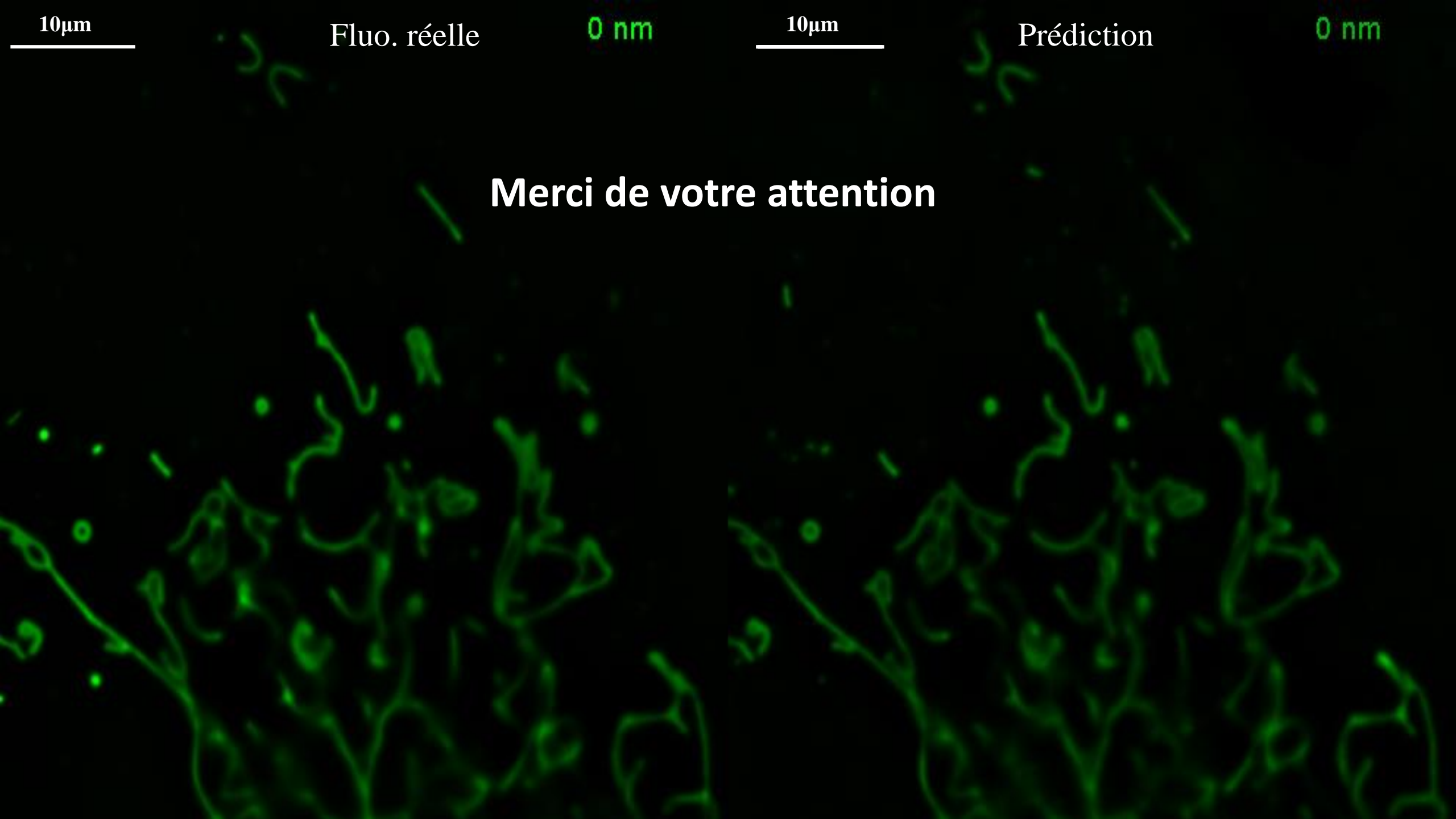
0 nm

10µm

Prédiction

0 nm

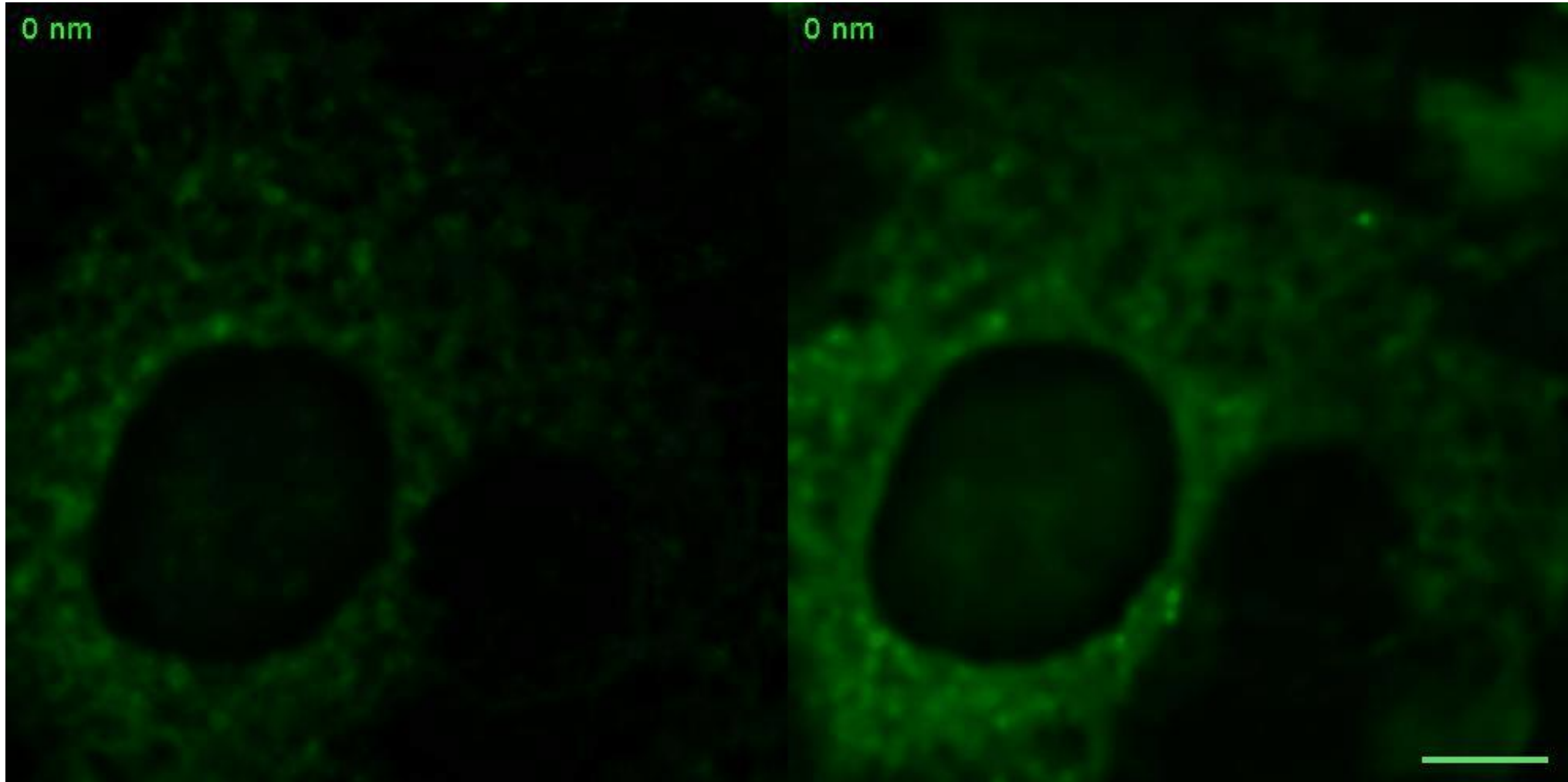
**Merci de votre attention**



# *Reticulum endoplasmique*

**Fluorescence réelle**

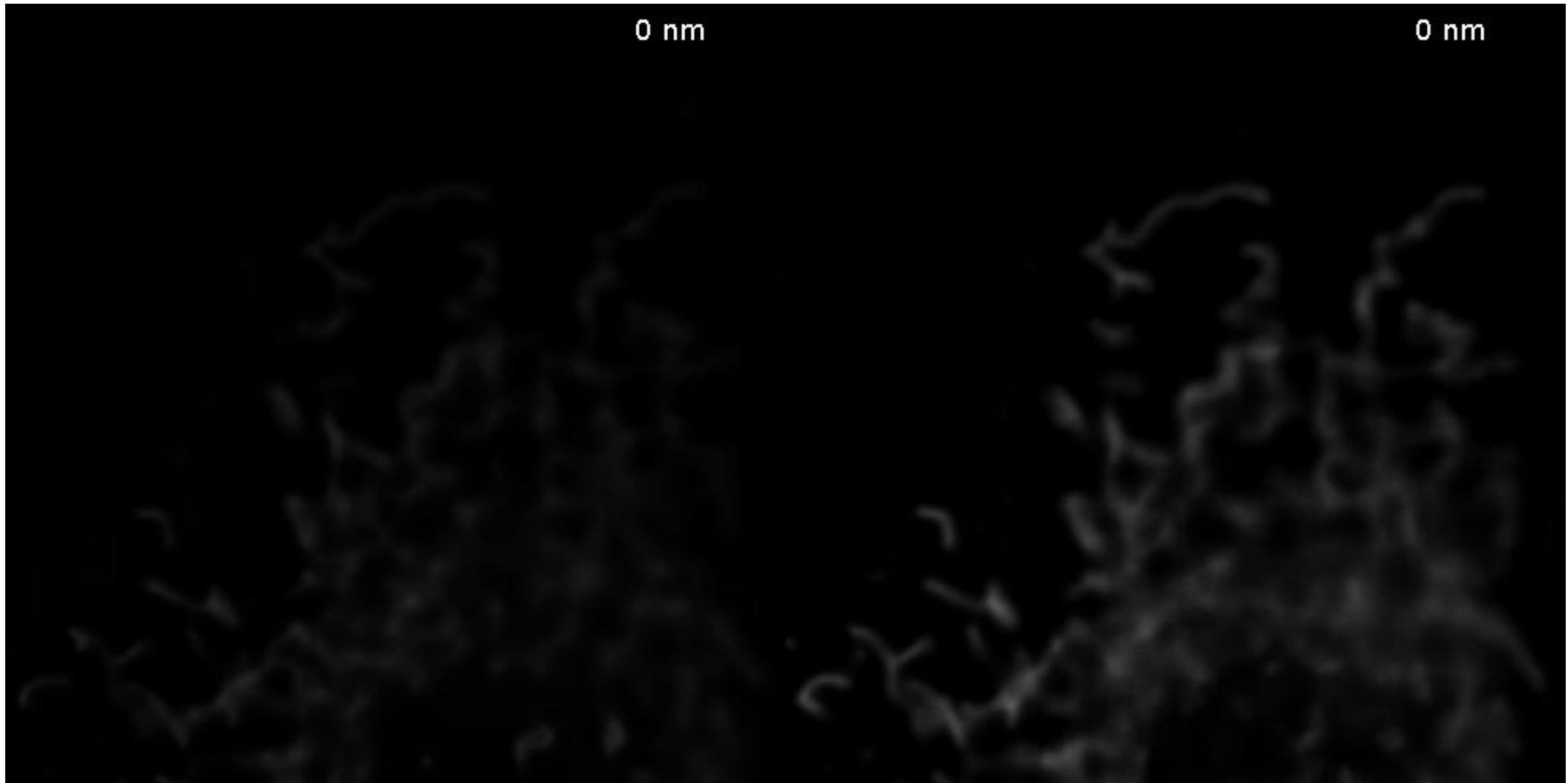
**Prédiction**



# *Couche par couche*

**Fluorescence réelle**

**Prédiction**



# Session 5: Contrôle Non Destructif & Caractérisation

*Chairman : Adrien Stolidi*

- *Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase par rayons X. **Georges Giakoumakis**, ONERA*
- *Imagerie de phase par IDML sur source de rayons X laser-Plasma. **Amélie Ferré**, LP3*
- *Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude de l'interaction laser – matière. **Laurent Gallais**, Institut Fresnel*
- *Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie. **Aurélien Houard**, LOA*



# Session 5: Contrôle Non Destructif & Caractérisation

*Chairman : Adrien Stolidi*

- *Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase par rayons X. **Georges Giakoumakis**, ONERA*
- *Imagerie de phase par IDML sur source de rayons X laser-Plasma. **Amélie Ferré**, LP3*
- *Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude de l'interaction laser – matière. **Laurent Gallais**, Institut Fresnel*
- *Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie. **Aurélien Houard**, LOA*

# Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase en rayons X

**Georges Giakoumakis**

1<sup>e</sup> rencontre sur l'interférométrie à décalage multi-latéral

12 mai 2023

# Une brève introduction ...



Première radiographie produite par Röntgen, 1895.

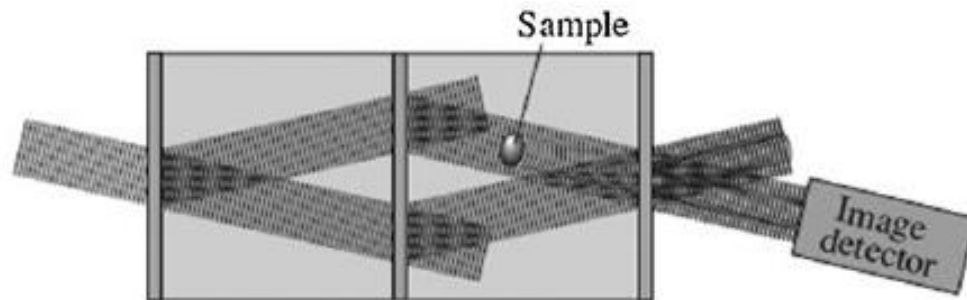
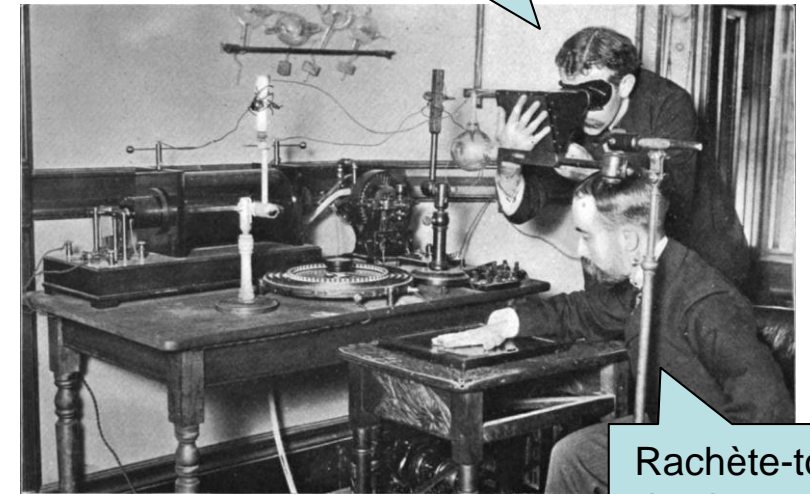


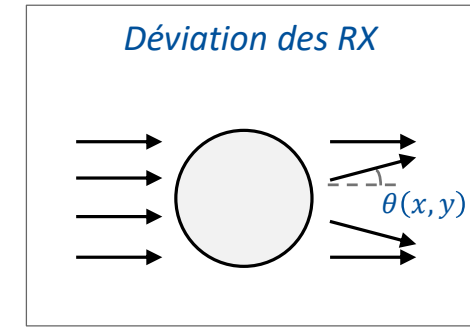
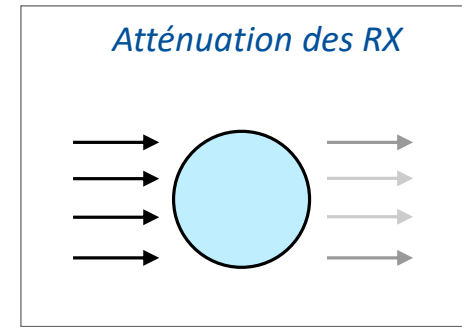
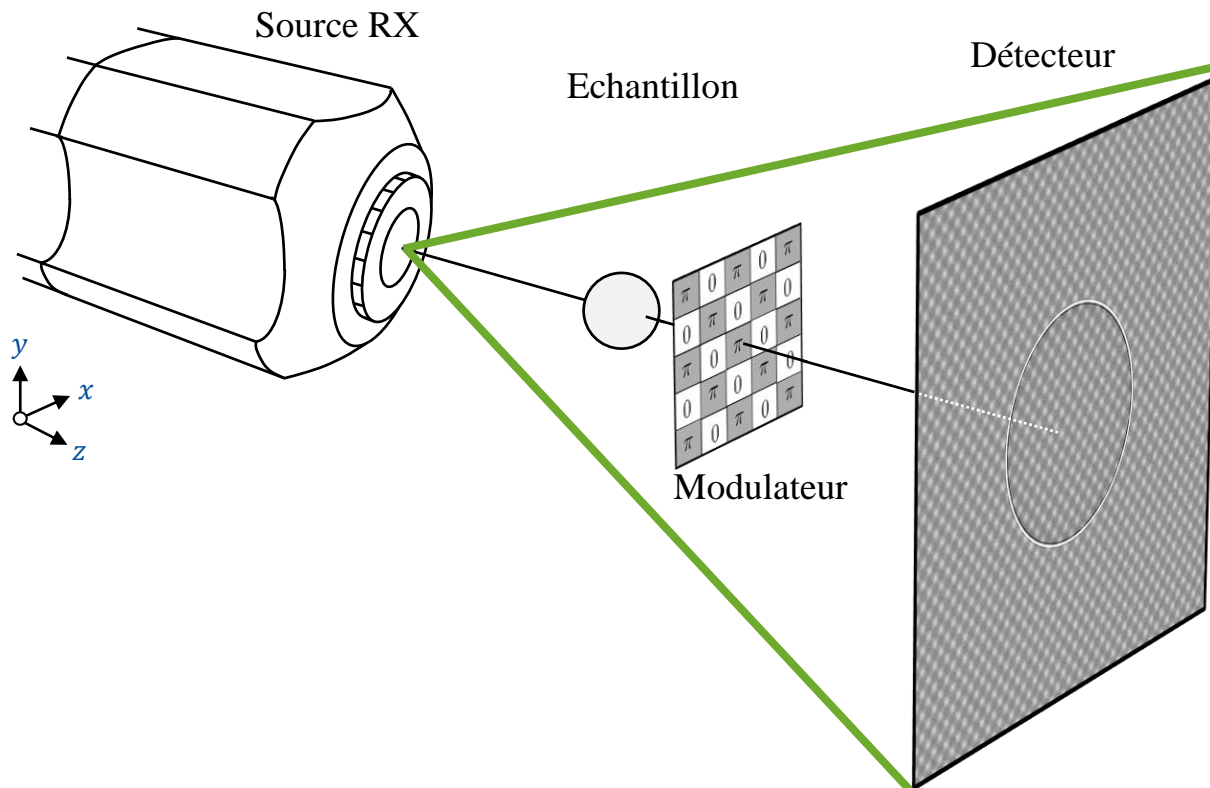
Schéma du premier interféromètre en rayons X à cristaux, Bonse & Hart, 1965.



Étalonnage d'un tube à rayons X "à la main", Philadelphie, État de Pennsylvanie, 1896.

# Une brève introduction ...

**Objectif :** Dimensionner un banc d'imagerie de phase en rayons X compact, versatile, à haute résolution spatiale ( $\approx \mu\text{m}$ ) pour l'inspection de matériaux composites.



Angles de réfractons  $\theta$  typiques en rayons X :  
 $\theta \sim \mu\text{rad}$

→ **Nécessité de travailler à haute résolution**

# Une brève introduction ...

- Objet à transition abrupte  $\Rightarrow$  Large extension dans le plan de Fourier.
- Ici la transition d'intensité est liée à la courbure de l'onde  $\nabla^2 \phi(x, y)$ .

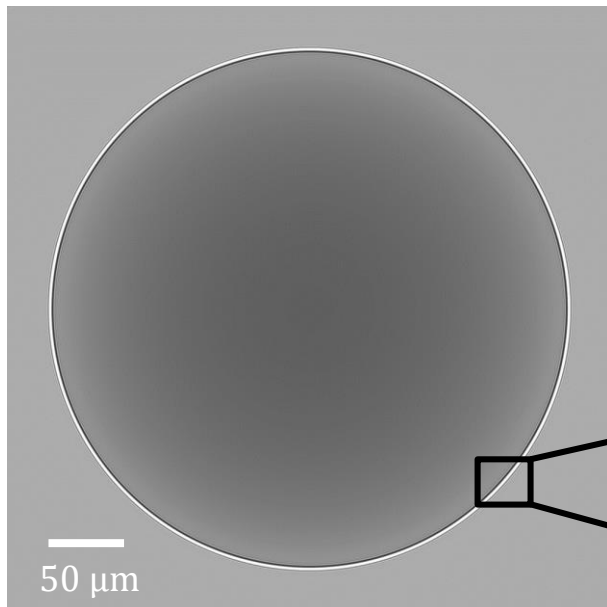
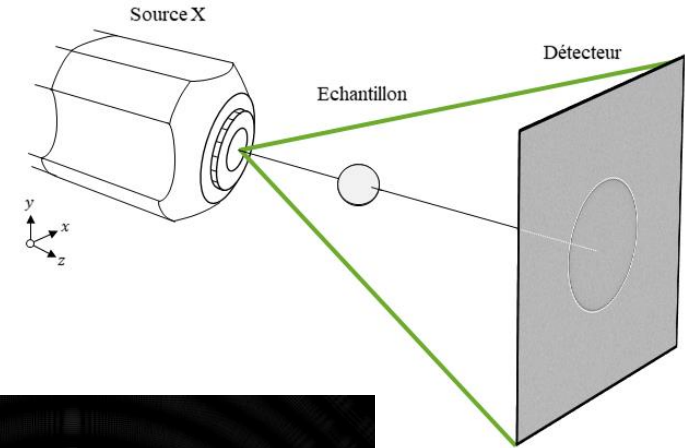
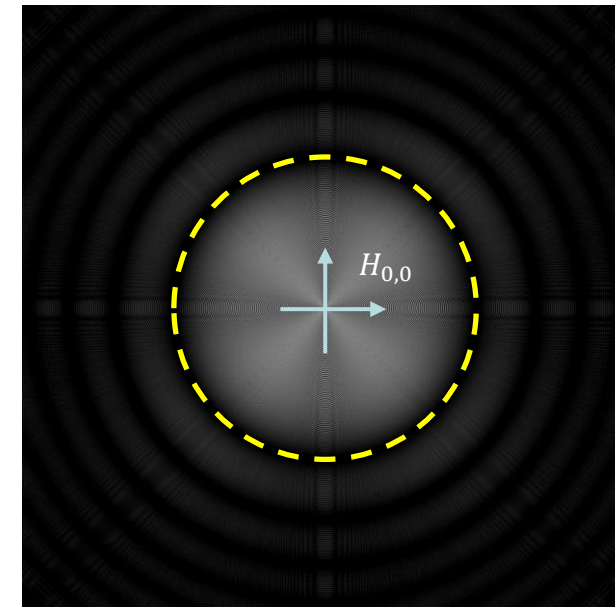


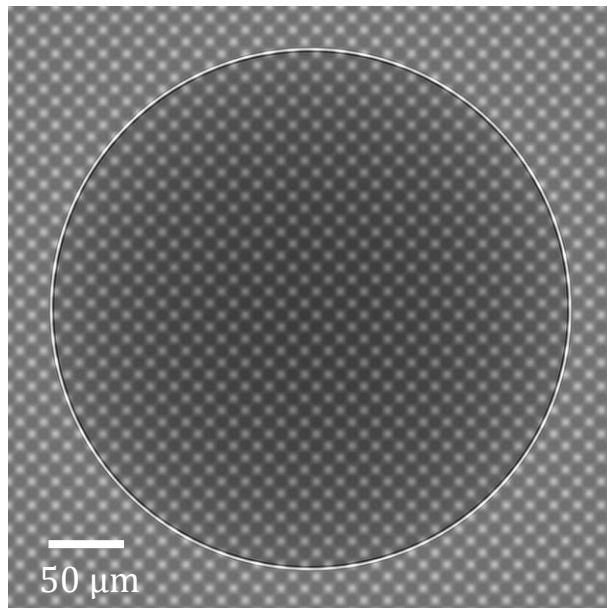
Image de l'objet :  $I_{obj}$



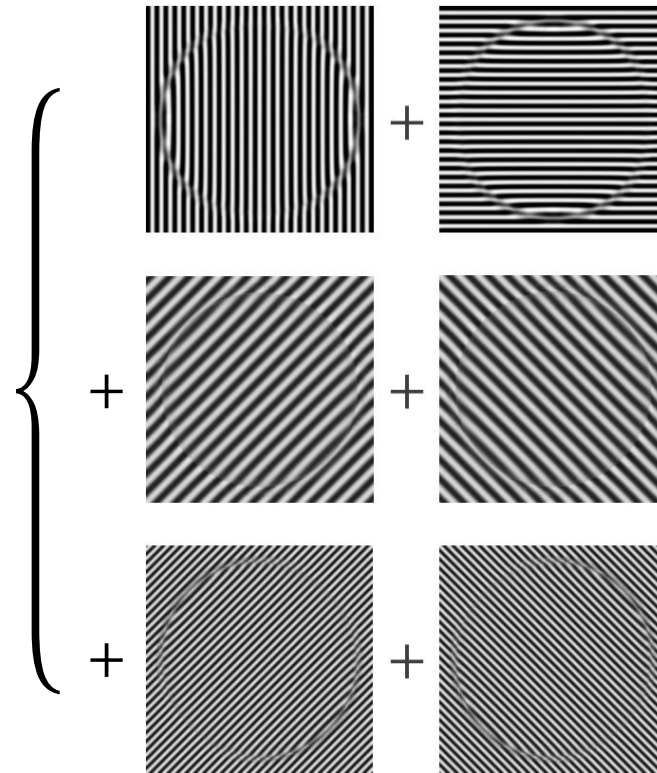
Transformée de Fourier associée

# Une brève introduction ...

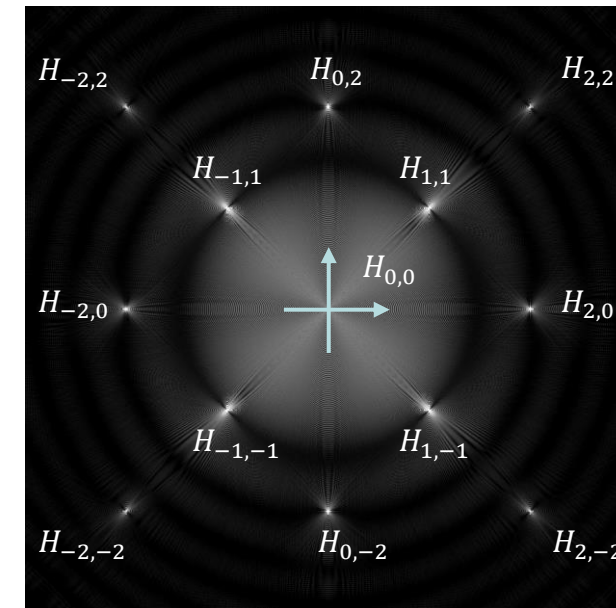
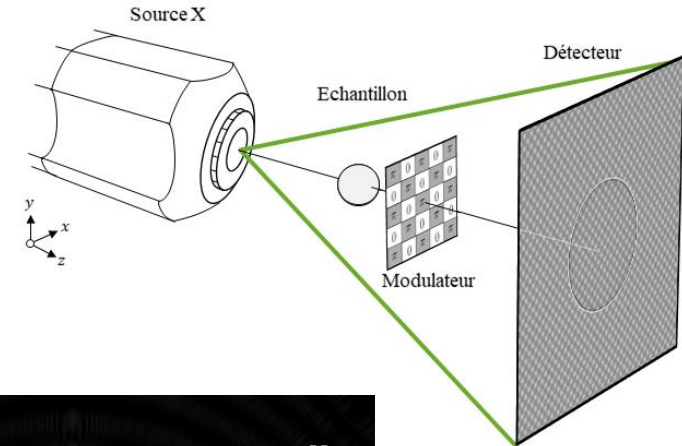
- Modèle 5 ordres.
- 13 harmoniques dans le plan de Fourier.



Interférogramme modulé:  $I_{mod}$



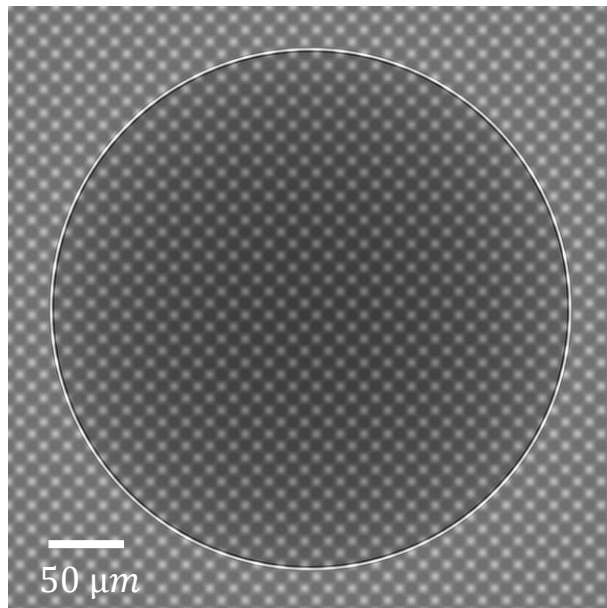
Décomposition en série de Fourier



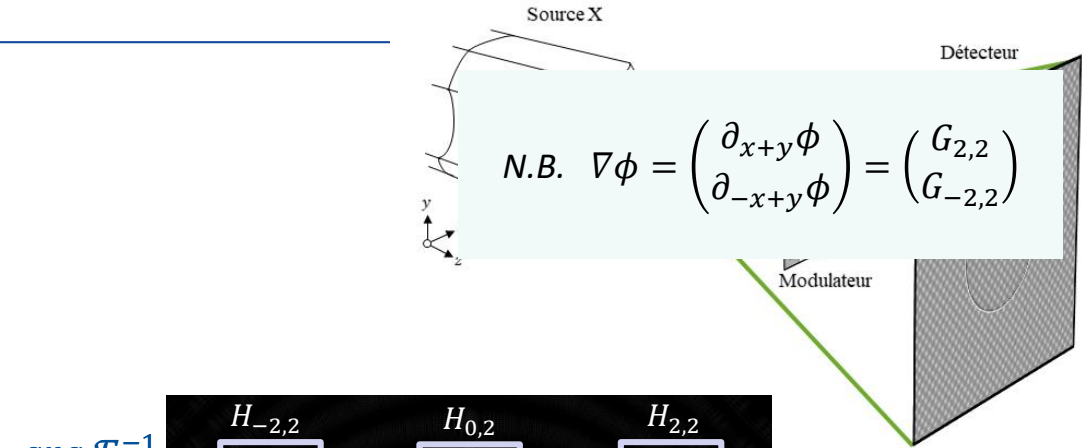
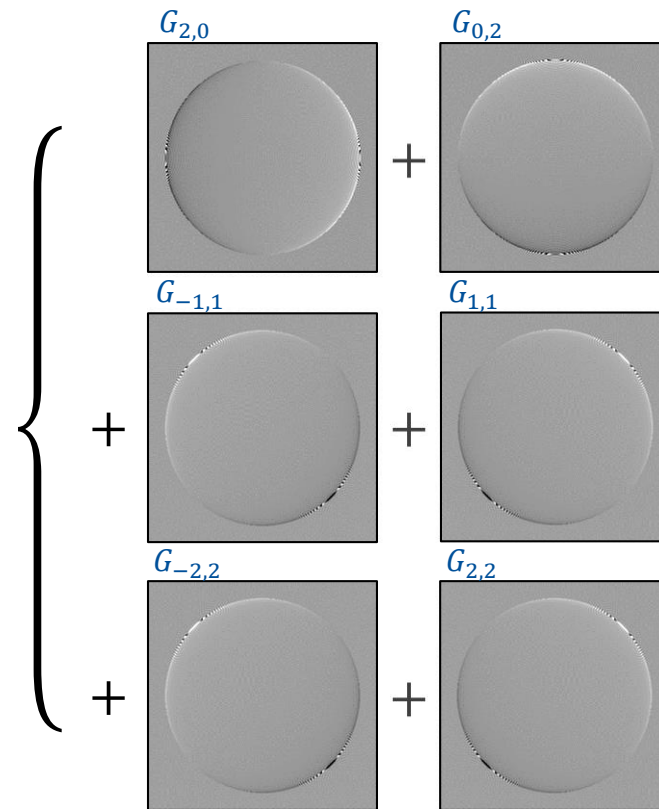
Transformée de Fourier associée

# Une brève introduction ...

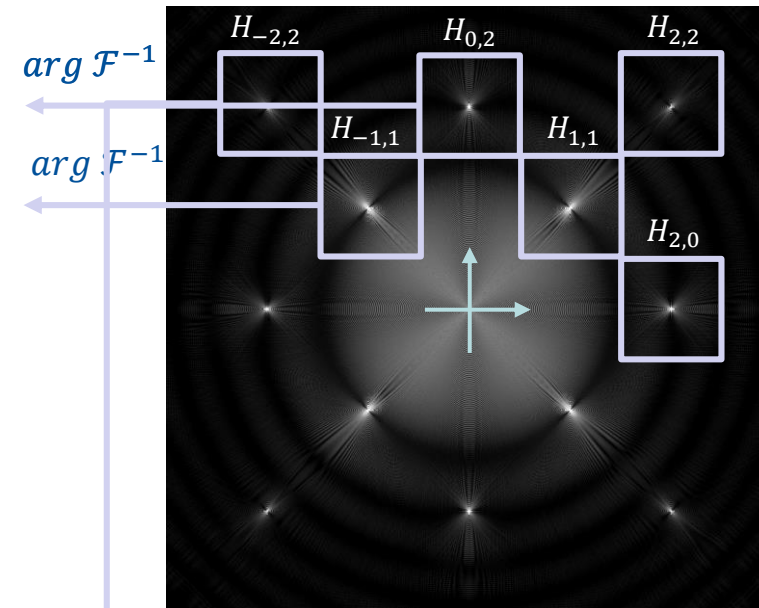
- Modèle 5 ordres.
- 13 harmoniques dans le plan de Fourier.



Interférogramme modulé:  $I_{mod}$



$$N.B. \nabla \phi = \begin{pmatrix} \partial_{x+y} \phi \\ \partial_{-x+y} \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{2,2} \\ G_{-2,2} \end{pmatrix}$$



Transformée de Fourier associée

Estimation des gradients de phase

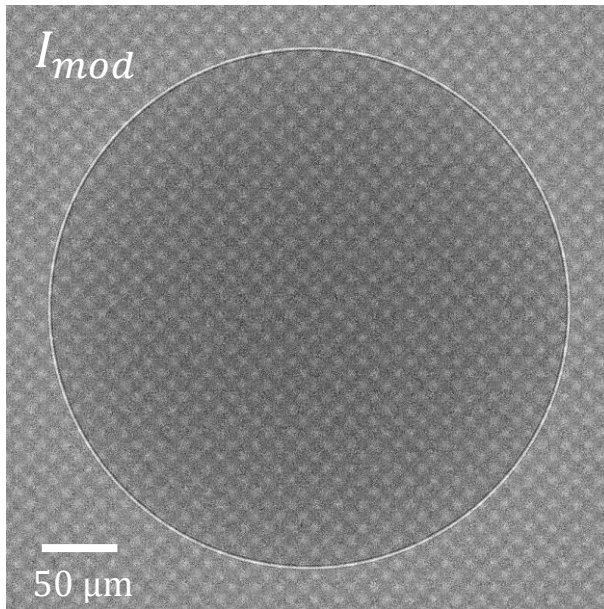
# Sommaire

---

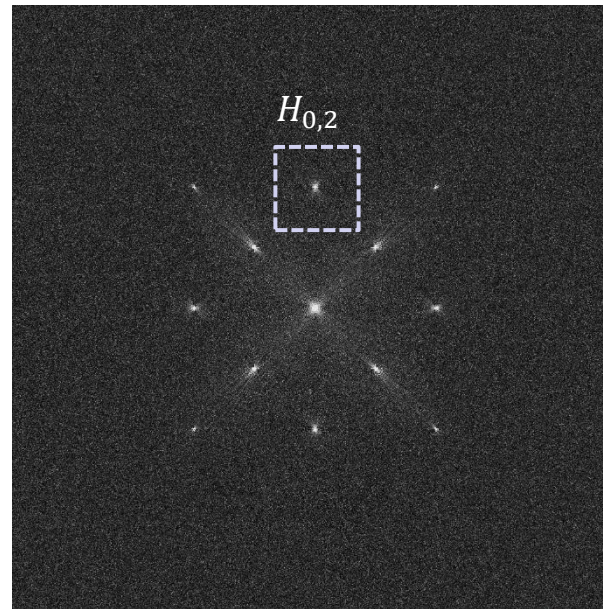
1. Quelles contraintes en rayons X ?
2. Correction d'artefacts d'extraction
3. Mise en œuvre sur banc de laboratoire
4. Pour aller plus loin ...



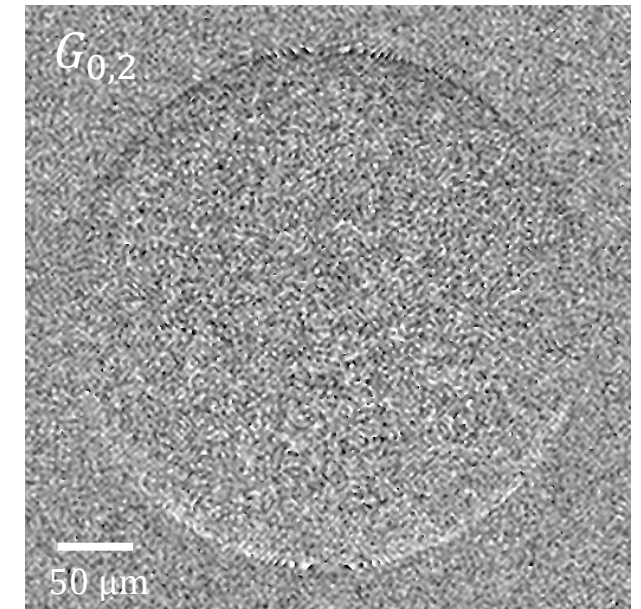
# 1. Limitation par le bruit de mesure



$RSB_{I_{mod}}$



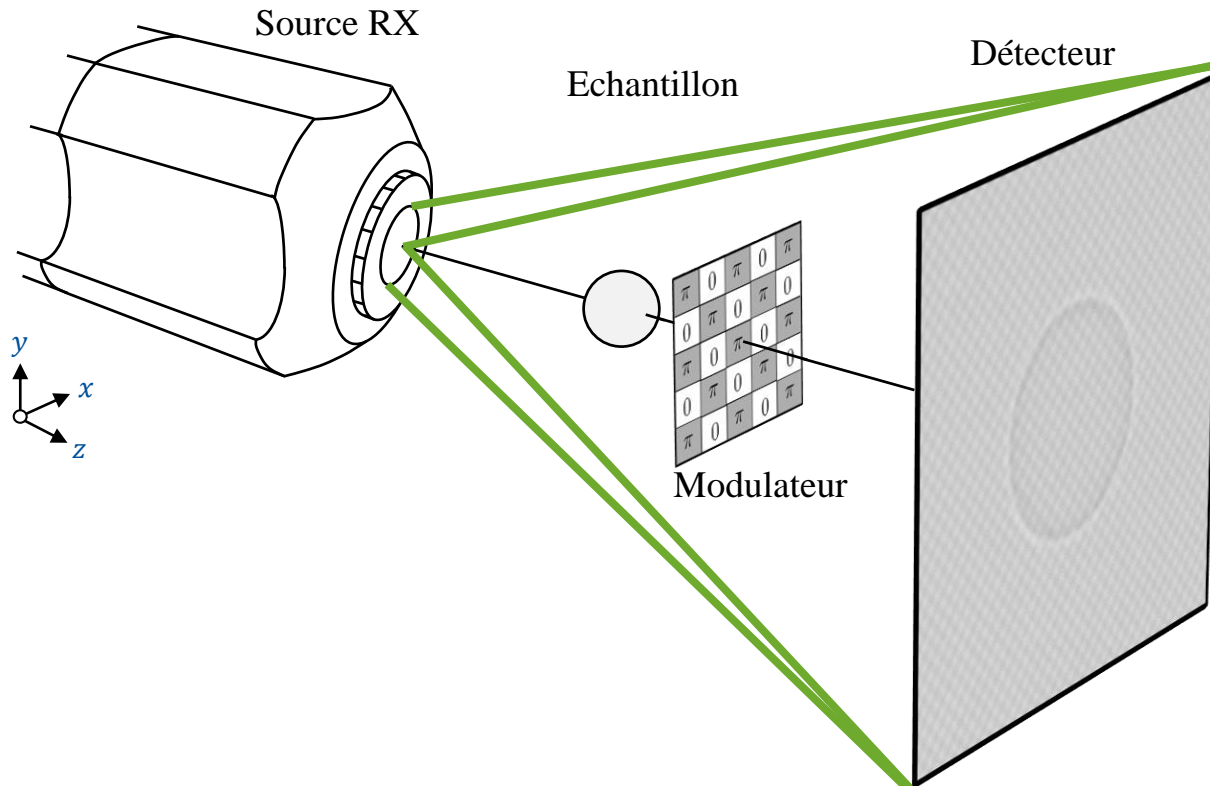
>



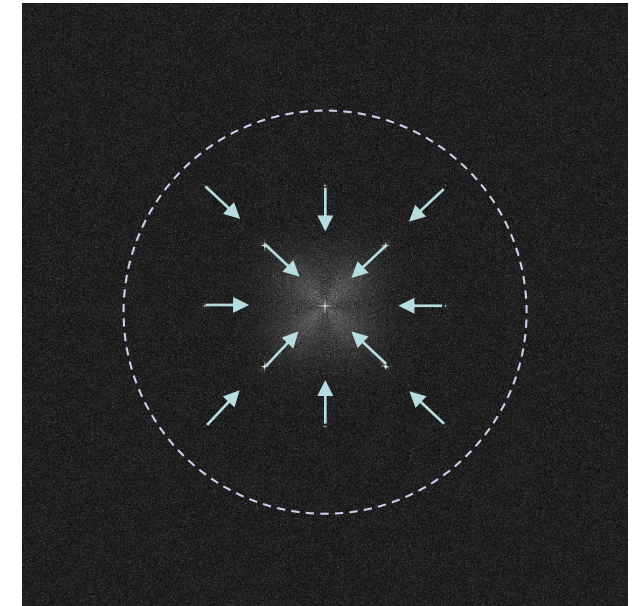
$RSB_{G_{k,l}}$

# 1. Limitation par le bruit de mesure

- Pour augmenter le  $RSB$  d'entrée, on peut augmenter le flux  $X$ .
- $\Rightarrow$  Diminue la cohérence spatiale de la source.
- $\Rightarrow$  Réduit les hautes fréquences spatiales de l'image.
- $\Rightarrow$  Réduit le  $RSB$  des gradients de phase.



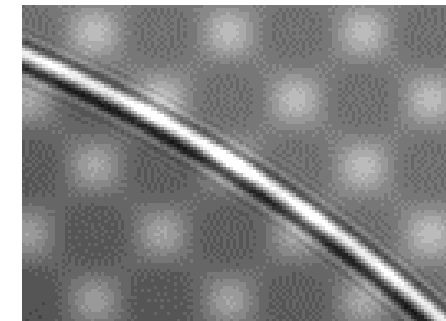
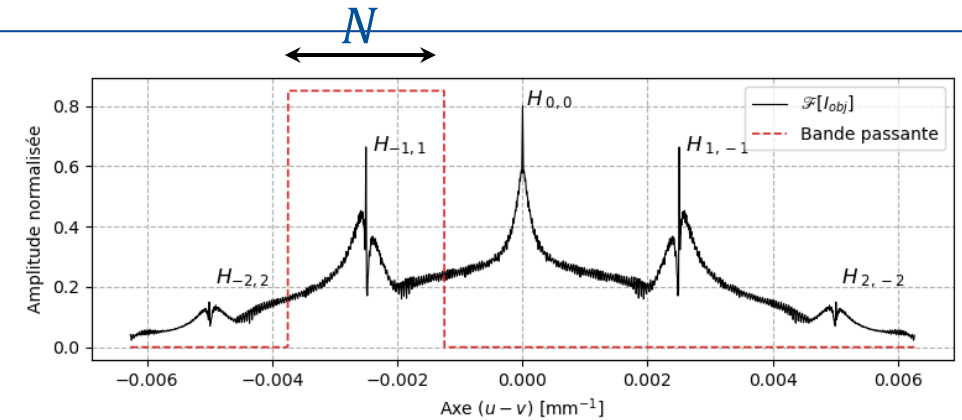
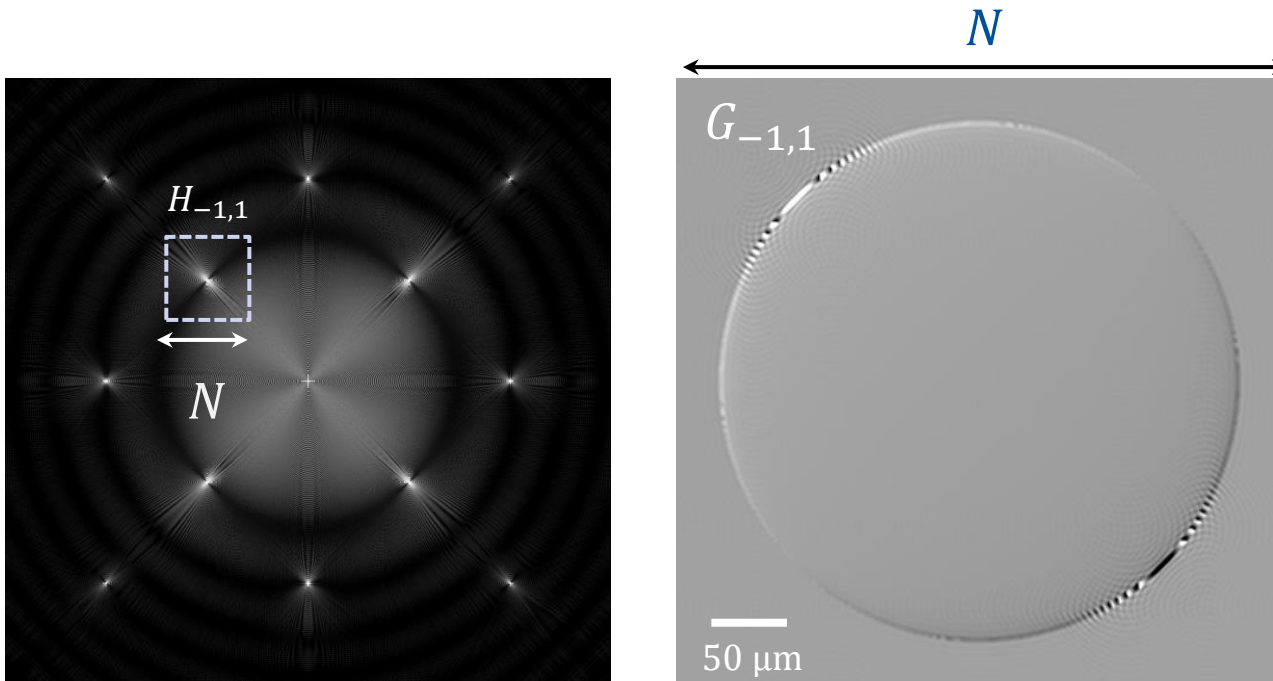
$\Rightarrow$  Nécessité de rapprocher les harmoniques  $H_{k,l}$  au centre.



*Impact de la perte de cohérence spatiale sur le spectre du signal*

# 1. Echantillonnage de phase

- Résolution de l'image de phase.  $\Rightarrow$  Taille de la bande passante.
- Rapprocher les harmoniques  $\Rightarrow$  Réduire la taille de bande.
  1. Perdre les hautes fréquences spatiales de l'objet.
  2. Ajouter des fréquences parasites dans la bande (chevauchement par  $H_{0,0}$ ).



Si l'intensité de l'objet varie plus rapidement que la période  $p$ .

$\rightarrow$  Artefacts dans l'image de phase.

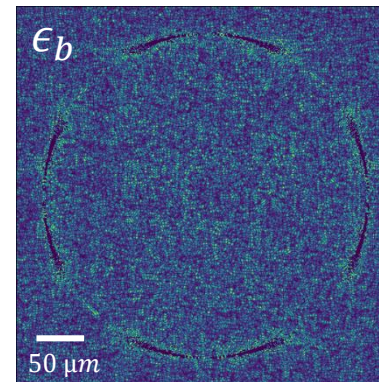
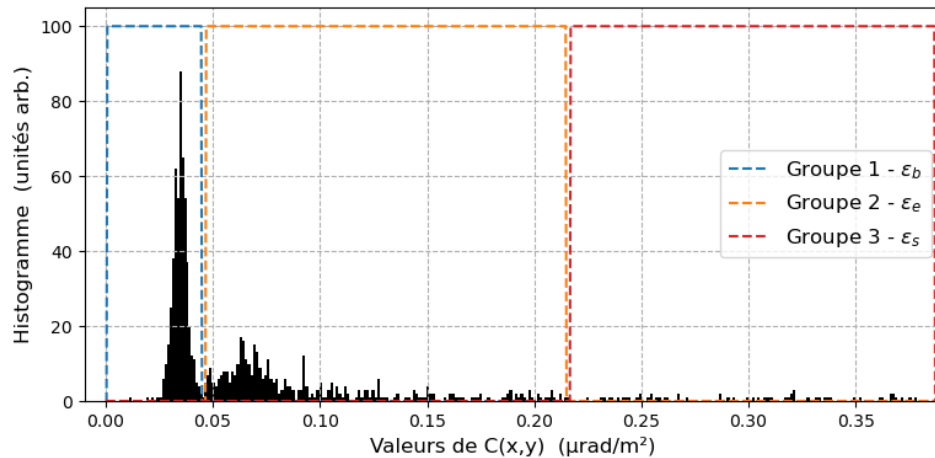
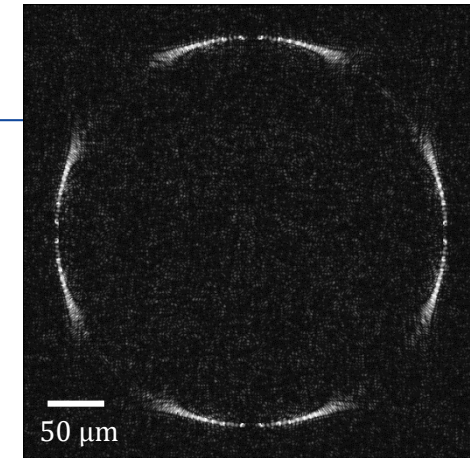
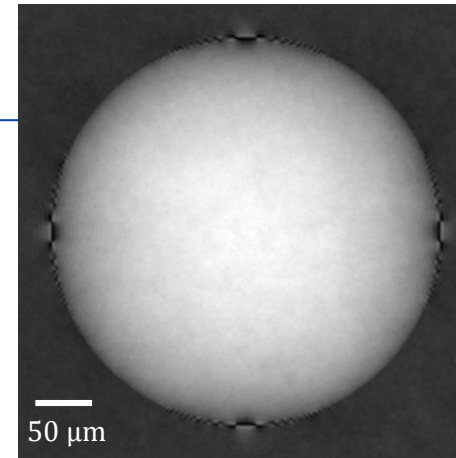
# 1. Carte de confiance

- Application à un cas quelconque :  $C(x, y) = \epsilon_b + \epsilon_e + \epsilon_s$
- *Objectif* : Discriminer chaque erreur en fonction de son type

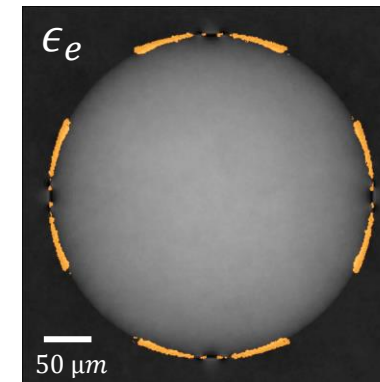
$\epsilon_b$  : reliée au bruit

$\epsilon_e$  : reliée à l'échantillonnage

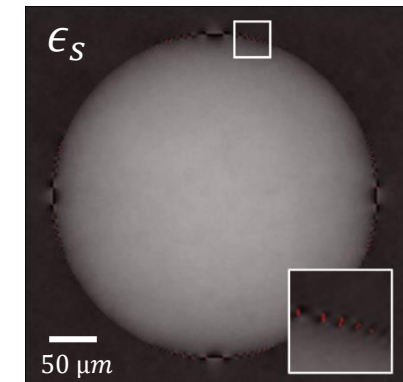
$\epsilon_s$  : reliée aux sauts de phase ( $\phi \in [0; 2\pi[$ )



Bruit



Sous-échantillonnage



Sauts de phase

[6] - Stolidi, Giakoumakis, Primot, Jarnac & Tisseur, "Confidence map tool for gradient-based X-ray phase contrast imaging", Optics Express, 2022

# Sommaire

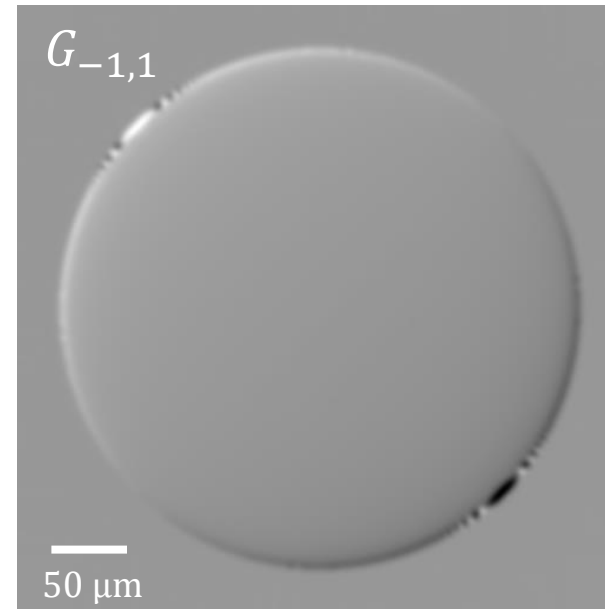
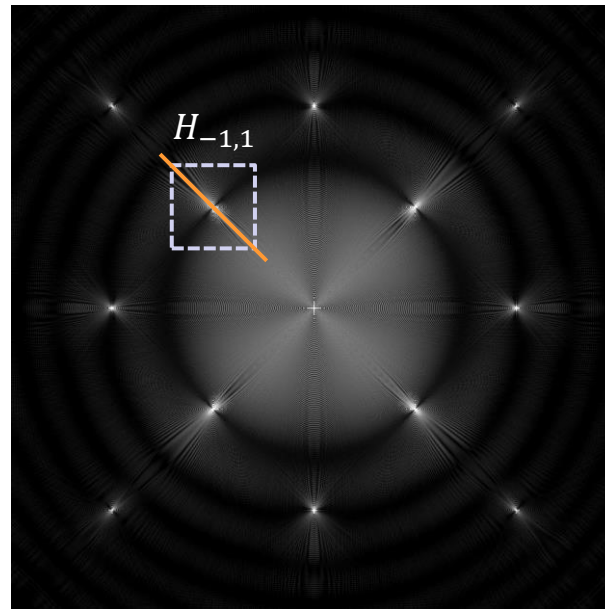
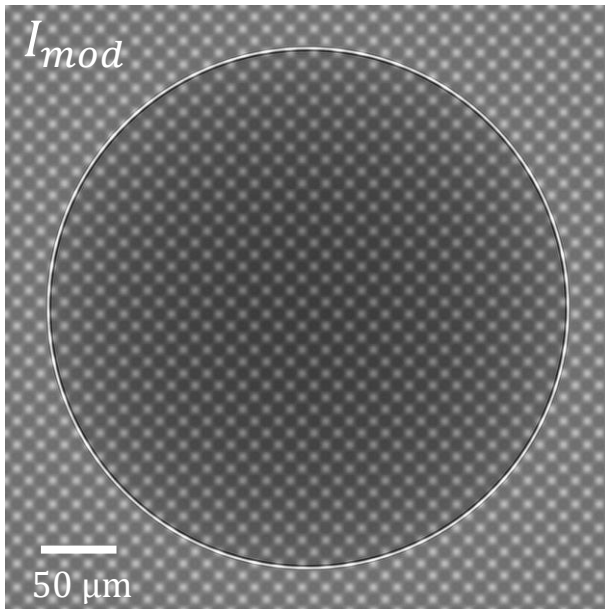
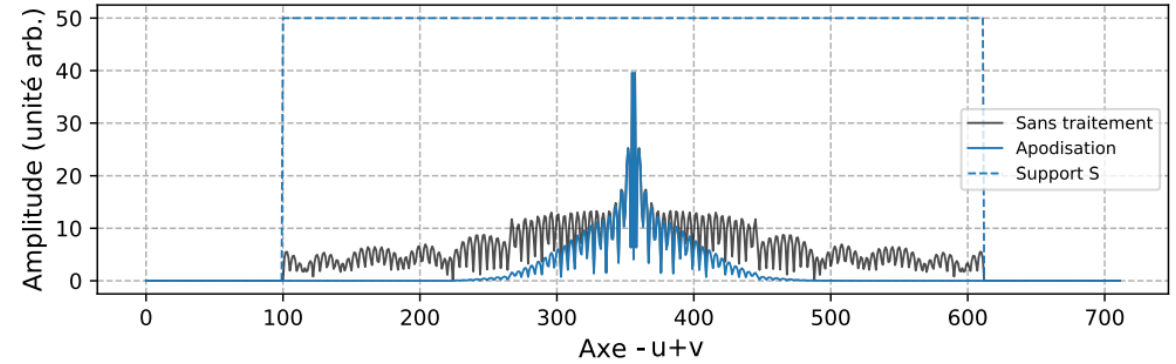
---

1. Quelles contraintes en rayons X ?
2. Correction d'artefacts d'extraction
3. Mise en œuvre sur banc de laboratoire
4. Pour aller plus loin ...

# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

- Variations abruptes d'intensité de l'objet.
- ⇒ Harmonique  $H_{0,0}$  étendu dans le plan de Fourier.

⇒ Artefacts.

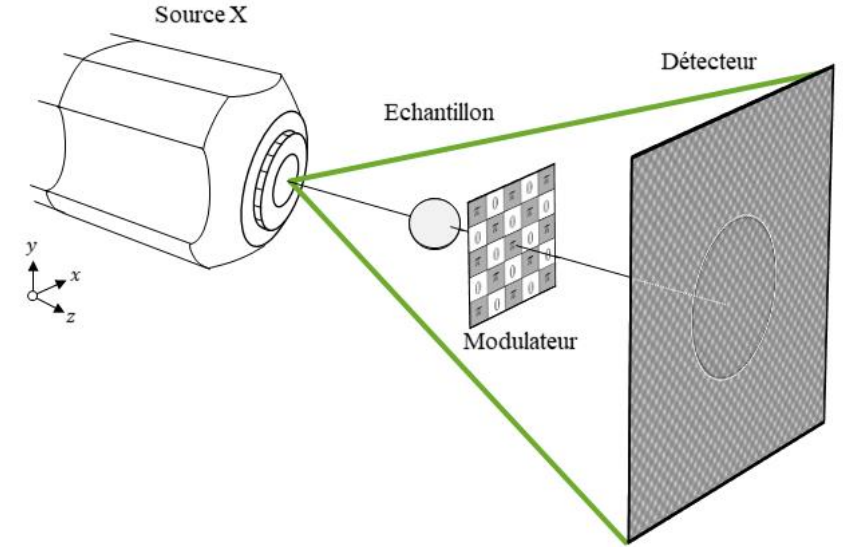


*Solution usuelle :*  
Apodiser le signal

⇒ Solution partielle

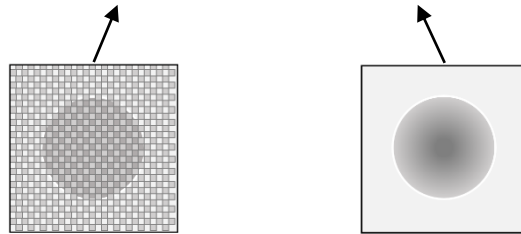
# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

- Minimiser l'amplitude de  $H_{0,0}$  dans le plan de Fourier.
- *Objectif* : Construire un nouvel interférogramme soustrait des variations d'intensité de l'objet.
- $\Rightarrow$  Soustraire  $I_{mod}$  par  $I_{obj}$ .



Expression analytique [1] :

$$I_{corr} = I_{mod} - \alpha I_{obj} + \beta$$



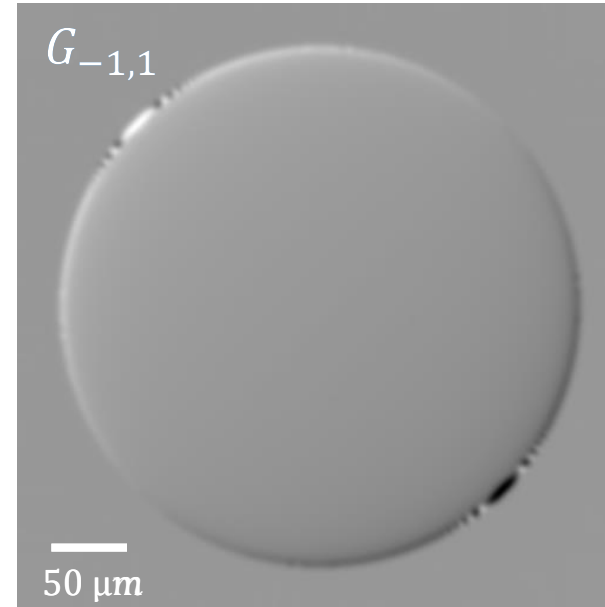
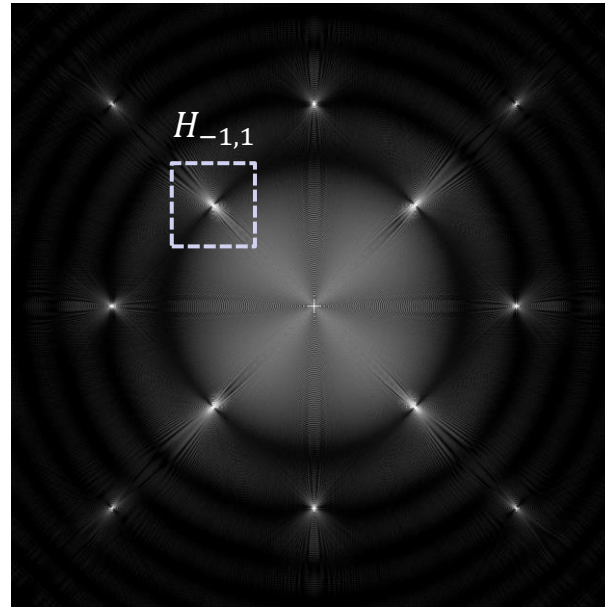
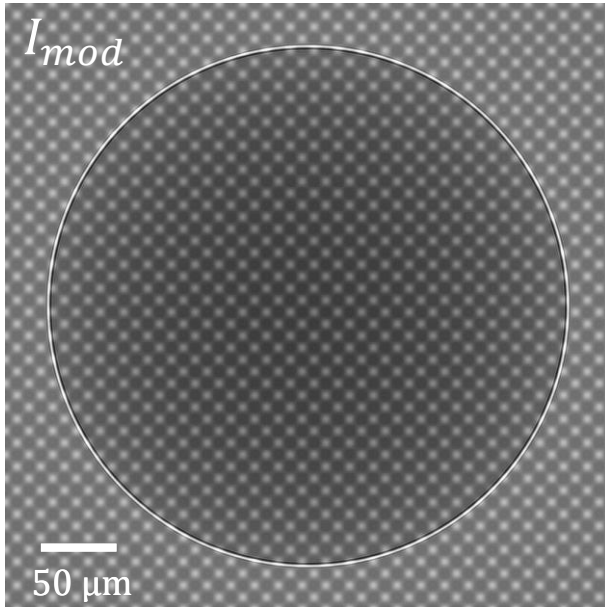
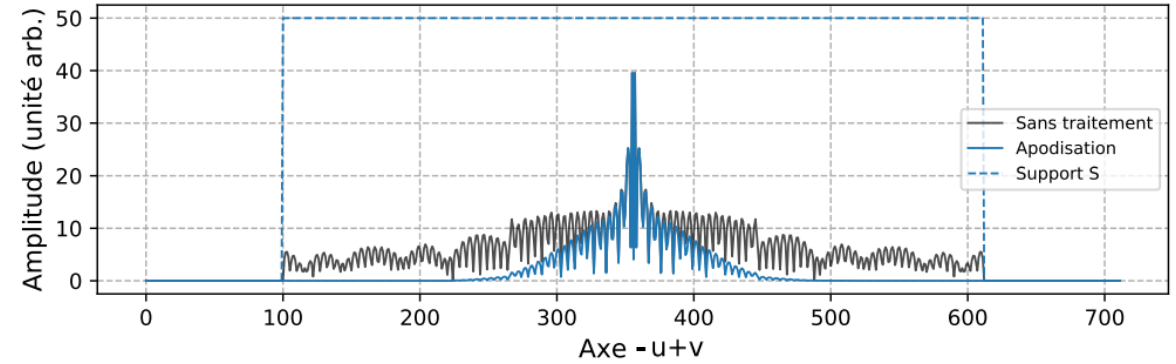
$$\alpha = \frac{\langle I_{mod} \rangle_{\Omega}}{\langle I_{obj} \rangle_{\Omega}} < 1$$

$$\beta = \langle I_{mod} \rangle_{\Omega}$$

[1] - Giakoumakis et al., "Artifacts reduction in high-acutance phase images for X-ray grating interferometry", Optics Express, 2022

## 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

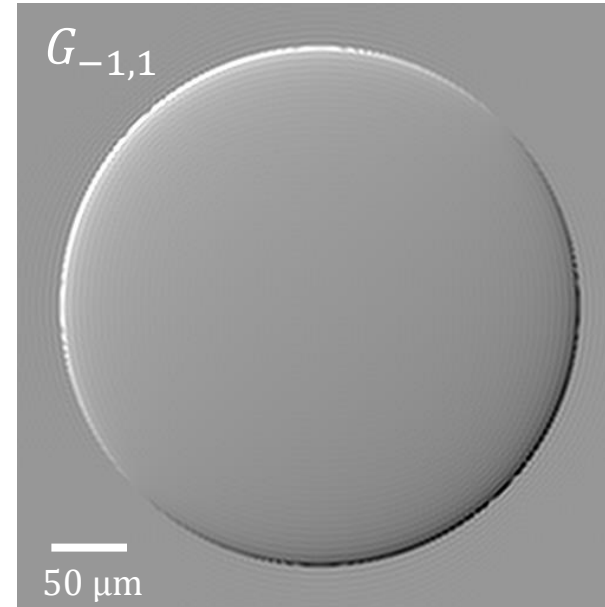
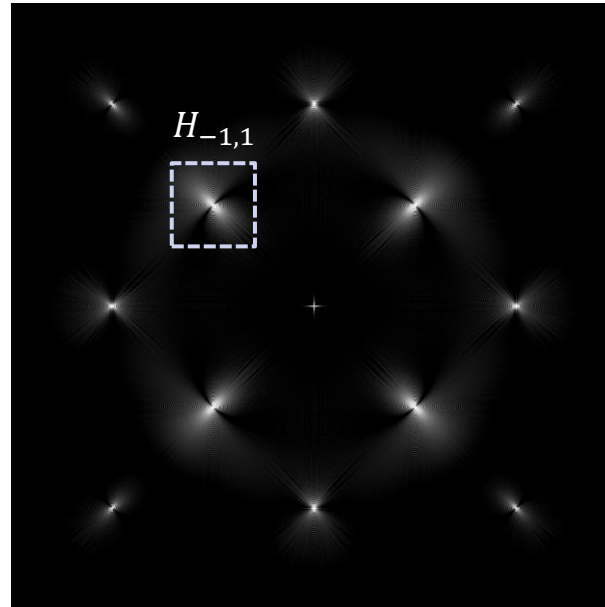
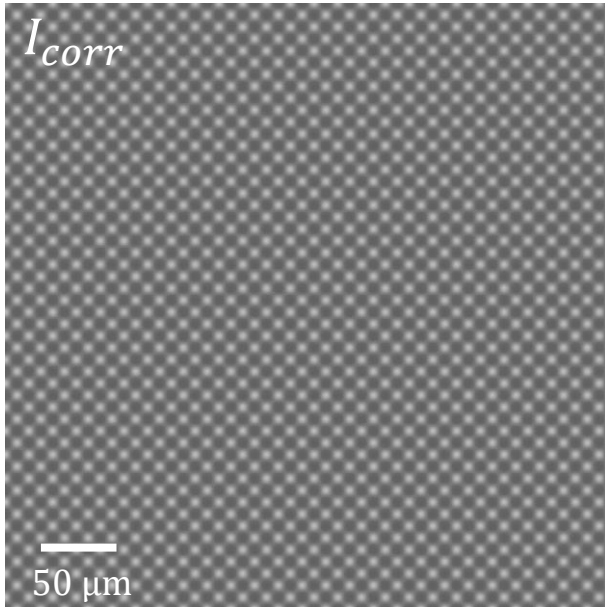
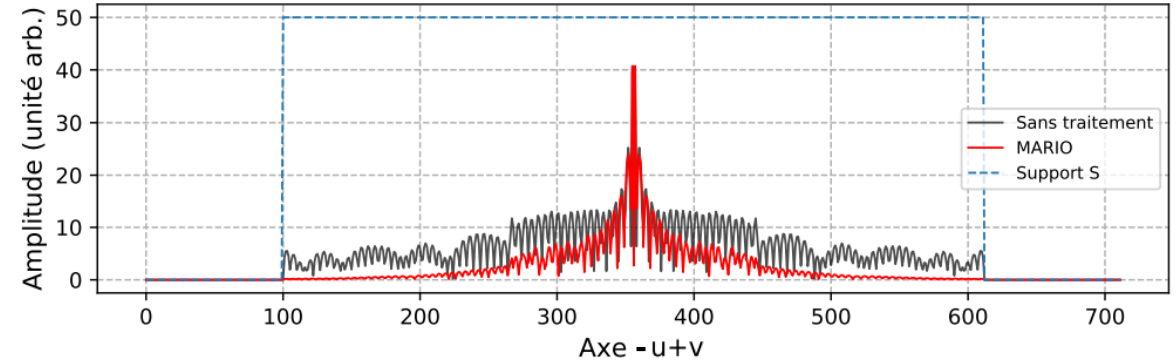
- Méthode linéaire  $\Rightarrow$  Travailler dans l'espace réel ou réciproque.
- Simple à implémenter numériquement.
- Nécessite l'acquisition séparée de  $I_{obj}$ .





# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

- Méthode linéaire  $\Rightarrow$  Travailler dans l'espace réel ou réciproque.
- Simple à implémenter numériquement.
- Nécessite l'acquisition séparée de  $I_{obj}$ .

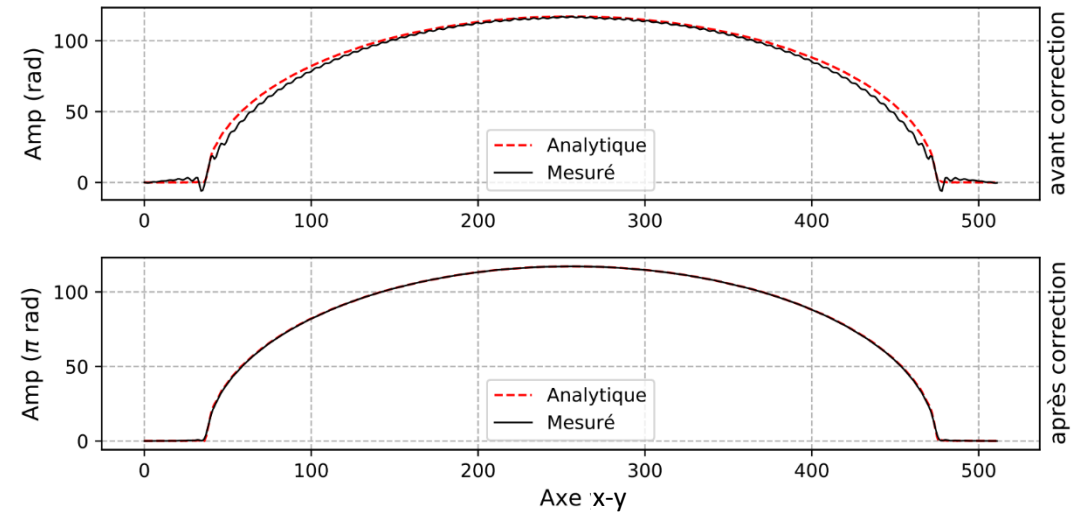
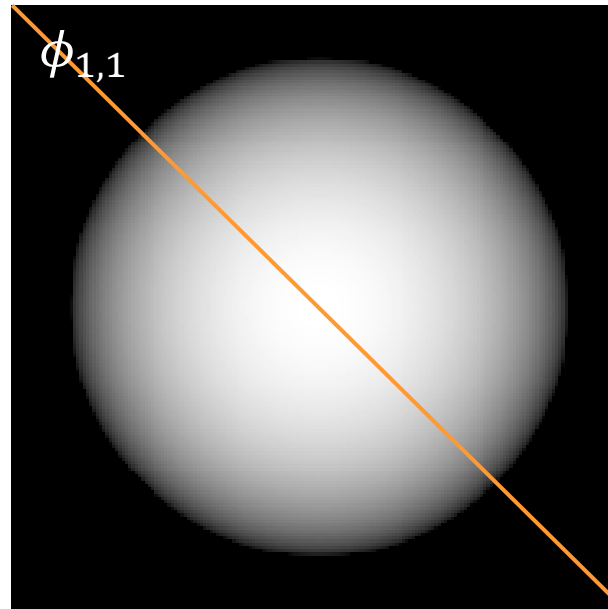
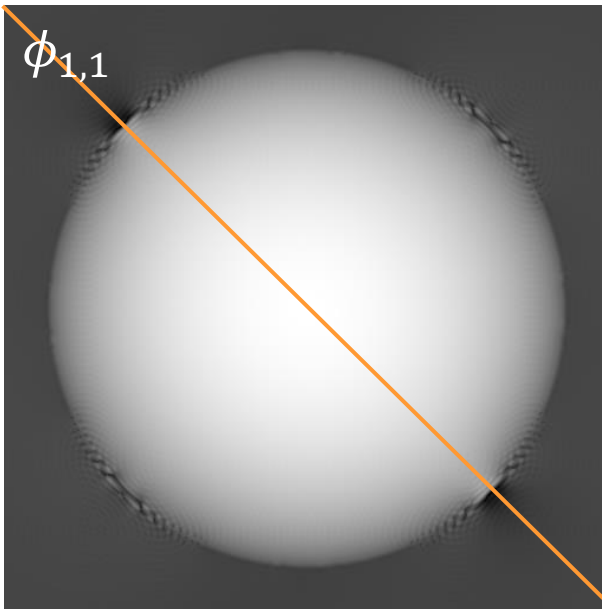
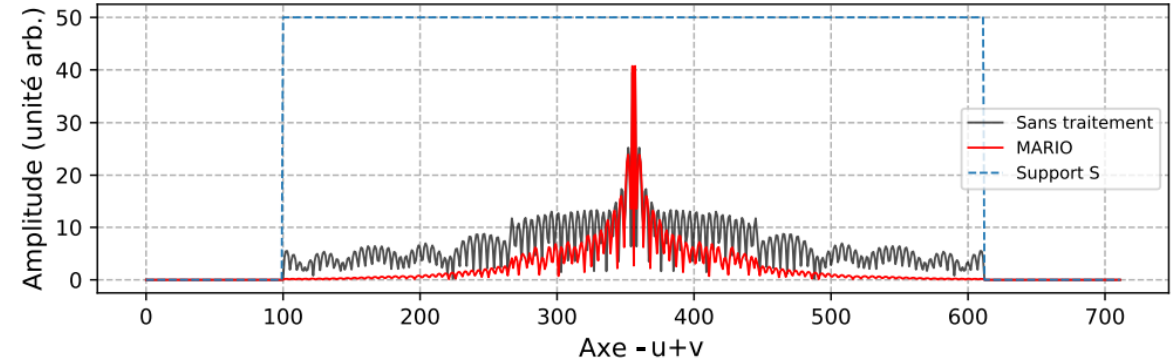


### Soustraction d'images :

- Conserve la résolution spatiale.
  - Traite les artefacts avant qu'ils n'apparaissent.
- $\Rightarrow$  **Solution adaptée.**

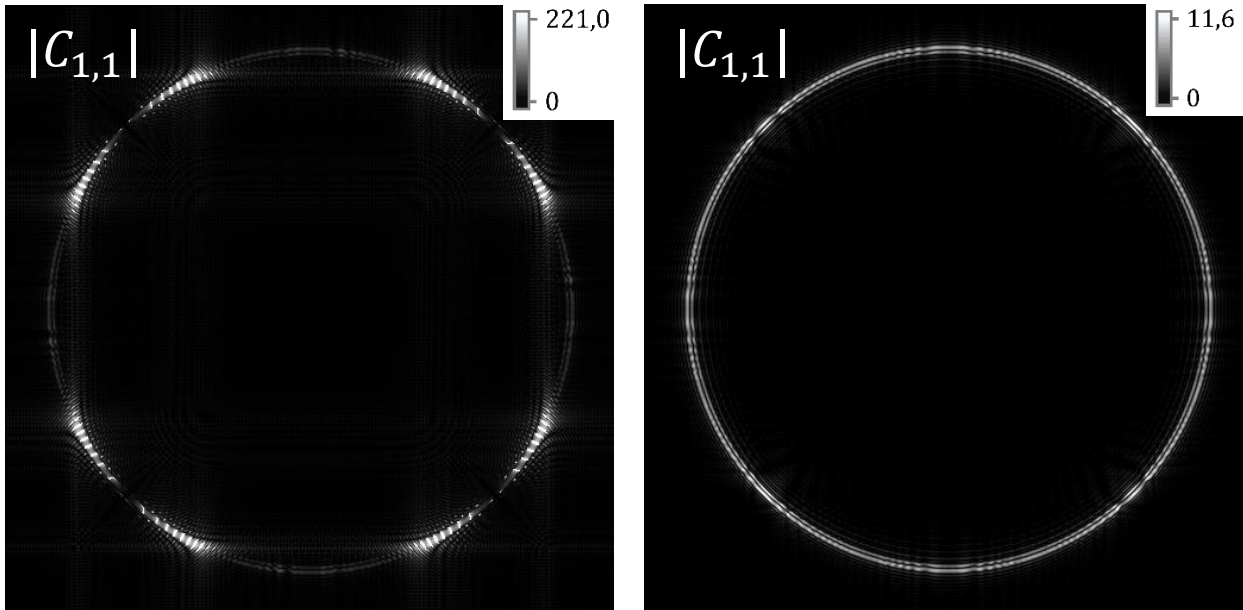
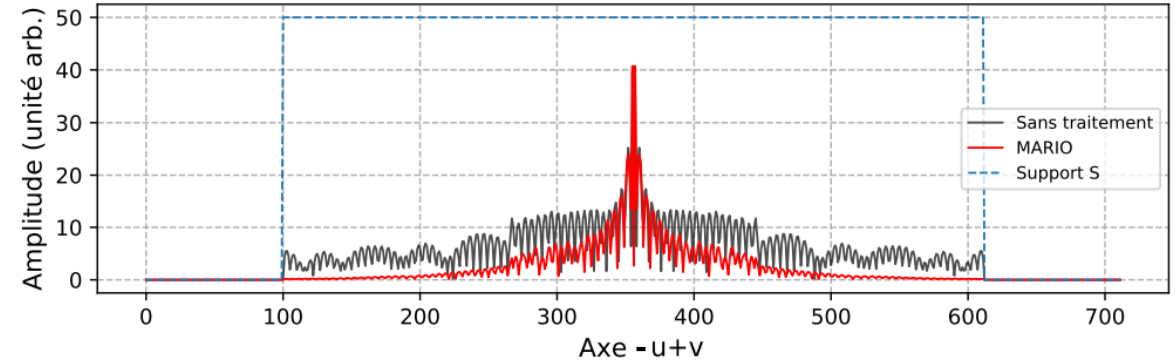
# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

- Méthode linéaire  $\Rightarrow$  Travailler dans l'espace réel ou réciproque.
- Simple à implémenter numériquement.
- Nécessite l'acquisition séparée de  $I_{obj}$ .



# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

- Méthode linéaire  $\Rightarrow$  Travailler dans l'espace réel ou réciproque.
- Simple à implémenter numériquement.
- Nécessite l'acquisition séparée de  $I_{obj}$ .

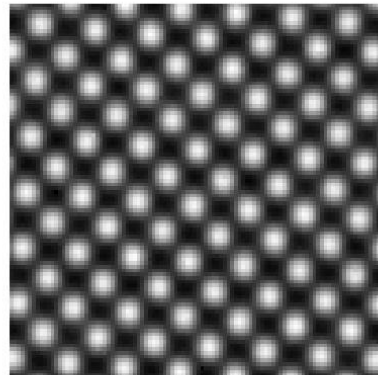


		Amplitude de $ C(x,y) $	RMS de $ C(x,y) $
$\phi_{1,1}$	Avant correction	221,0 $\mu\text{rad}/\text{m}$	23,8 $\mu\text{rad}/\text{m}$
	Après correction	11,6 $\mu\text{rad}/\text{m}$	0,3 $\mu\text{rad}/\text{m}$
Gain		1905 %	7933 %

# 2. Correction des artefacts de sous-échantillonnage

En synthèse

**M**ethod of  
**A**rtifact  
**R**eduction from the  
**!**ntensity of the  
**O**bject



Dérive observée entre les acquisitions.

## Atouts clés

- Méthode préventive
- Traitement simultané des artefacts sur tous les gradients de phase
- Traitement simultané des artefacts sur toutes les images de phase
- Traitement simultané des artefacts sur toutes les images de détramage
- Applicable expérimentalement
- Conserve la résolution spatiale de l'image

## Limitations

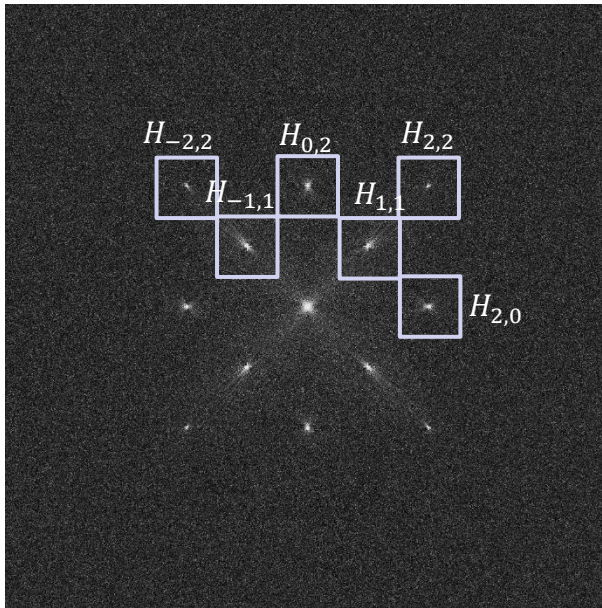
- Nécessite de mesurer séparément  $I_{obj}$  dans les mêmes conditions
- Légère diminution du  $RSB$  des images de phase



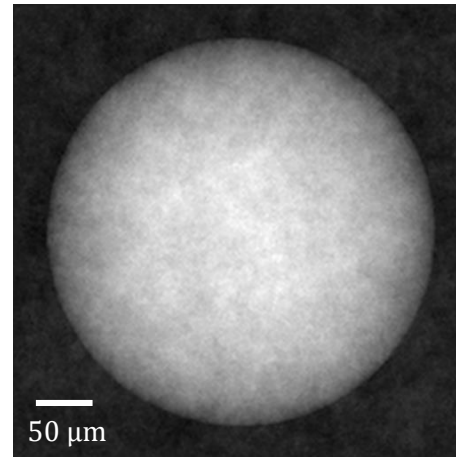
[1] - Giakoumakis et al., "Artifacts reduction in high-acutance phase images for X-ray grating interferometry", Optics Express, 2022

## 2. Réduction du bruit de phase

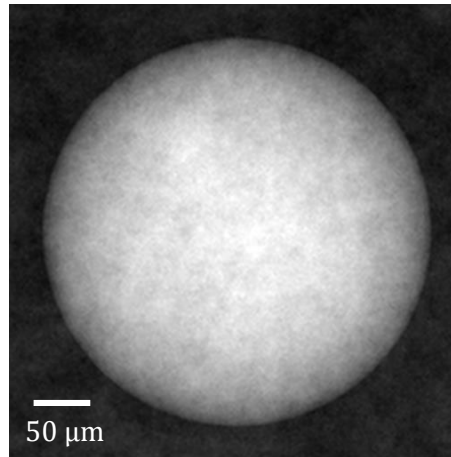
- Classiquement, 2 gradients sont utilisés pour la reconstruction de phase.
- En fonction du couple de gradients utilisé, on obtient une image de phase de  $RSB$  différent.



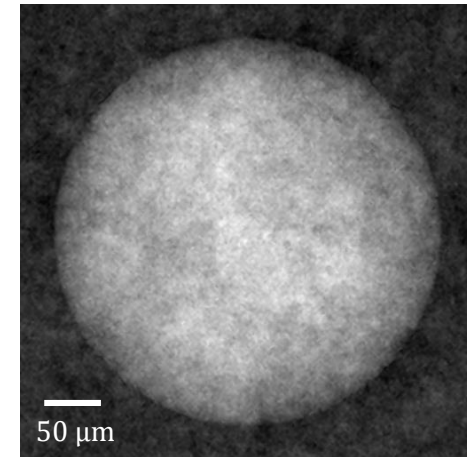
Plan de Fourier bruité



Phase unitaire  $\phi_{2,0}$



Phase unitaire  $\phi_{1,1}$

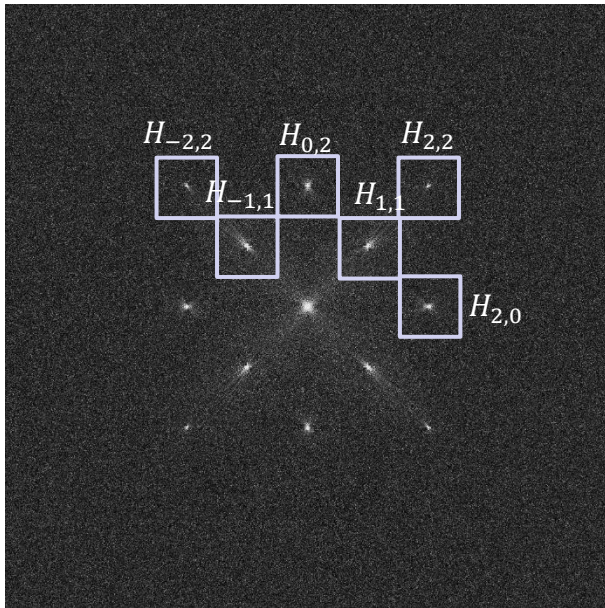


Phase unitaire  $\phi_{2,2}$

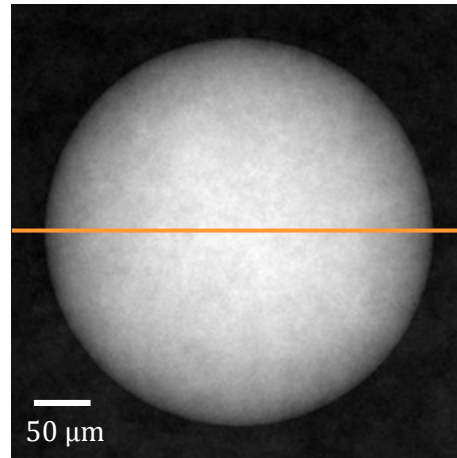
⇒ Exploiter la redondance accessible

# 2. Réduction du bruit de phase

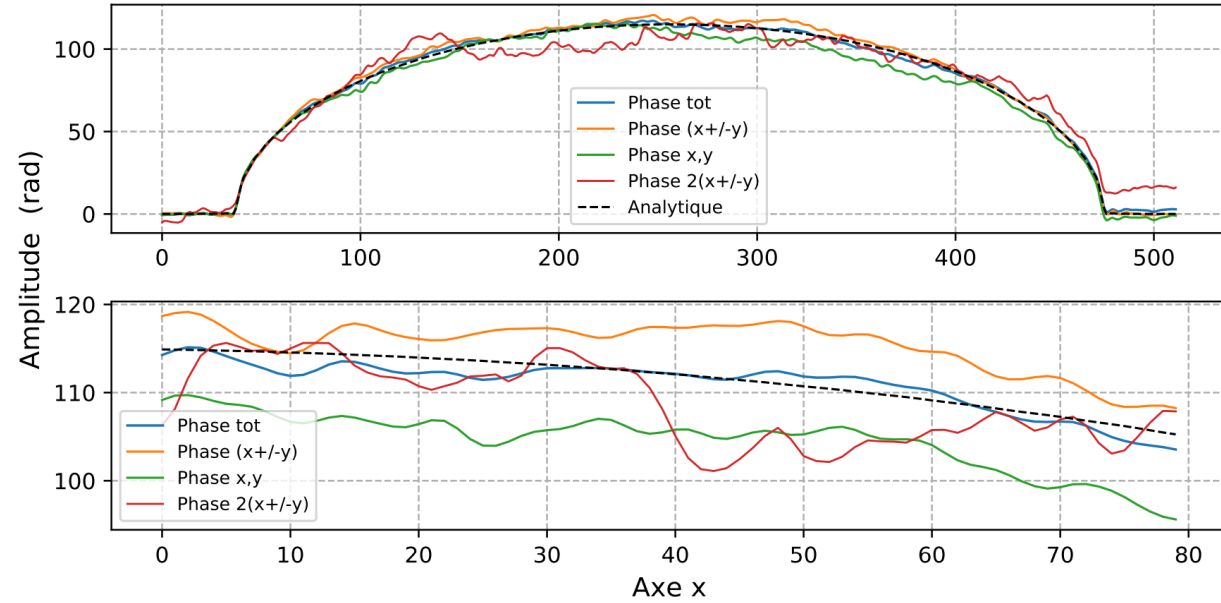
- Reconstruction sur l'ensemble des gradients extraits :  $\phi_{tot}$
- Pondération par la variance du bruit de chaque gradients.



Plan de Fourier bruité



Phase totale  $\phi_{tot}$  intégrée à 6 gradients



		RSB
Phases unit.	$\phi_{(x\pm y)}$	16,02
	$\phi_{x,y}$	13,61
	$\phi_{2(x\pm y)}$	5,38
Phase tot.	$\phi_{tot}$	20,84

+ 37 %

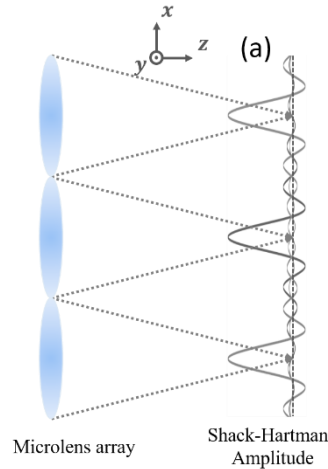
[2] Velghe et al. "Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers". Optics Letters, 2005

# 2. Réduction du bruit de phase

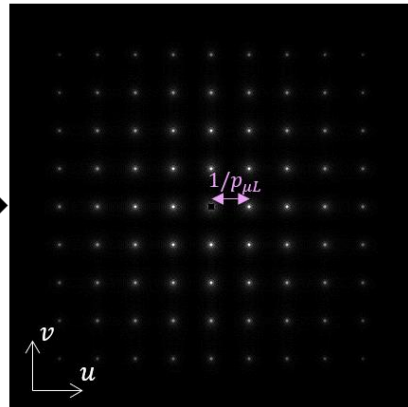
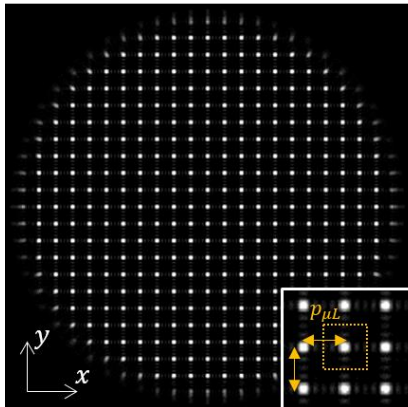


En synthèse

**M**éthode  
**M**oindres  
**C**arrés  
**P**ondérés



(a) Shack-Hartmann irradiance pattern



FT

## Atouts clés

- Exploite toute la redondance de la mesure
- Applicable à tout dispositif d'imagerie différentielle de phase [3]
- Maximise le RSB des images de phase par démodulation
- Pas d'*a priori* sur l'objet
- Cumulable avec la méthode MARIO



## Limitation

- Gain significatif qu'à partir d'un nombre élevé d'harmoniques



[3] Rouze, Giakoumakis, et al., "Extracting more than two orthogonal derivatives from a Shack-Hartmann Wavefront Sensor", Optics Express, 2020

# Sommaire

---

1. Quelles contraintes en rayons X ?
2. Correction d'artefacts d'extraction
3. Mise en œuvre sur banc de laboratoire
4. Pour aller plus loin ...





# 3. Mise en œuvre sur banc de laboratoire

## Contexte

- Foudroiement d'un avion de ligne  $\approx$  1500 h de vol (3 fois/an)
- Matériaux composites  $\rightarrow$  solution technique
- Quel état de dégradation des matériaux composites après un foudroiement ?



## Objectif scientifique

Reproduire l'expérience en laboratoire et évaluer les dégâts sur ce type de matériaux.

Publications

À propos

Photos

Mentions



ONERA - The French Aerospace Lab

10 mai · 🌐

✈️⚡ Un avion de ligne est foudroyé en moyenne toutes les 1500 h de vol, une tendance qui devrait augmenter avec le réchauffement climatique. L'ONERA mène des recherches pour comprendre et modéliser l'agression foudre.

En 2012, l'ONERA s'équipait d'un laboratoire foudre surnommé #Grifon. Il s'agit d'un générateur de courant permettant de simuler une foudre jusqu'à 100 000 ampères.

#Grifon reproduit les dégâts liés à un foudroiement sur des matériaux aéronautiques, afin de tester la résistance des nouveaux matériaux, (composites...)

➡ L'objectif : garantir un niveau de sécurité optimal des avions.

Plus d'infos : <https://urlz.fr/iegc>

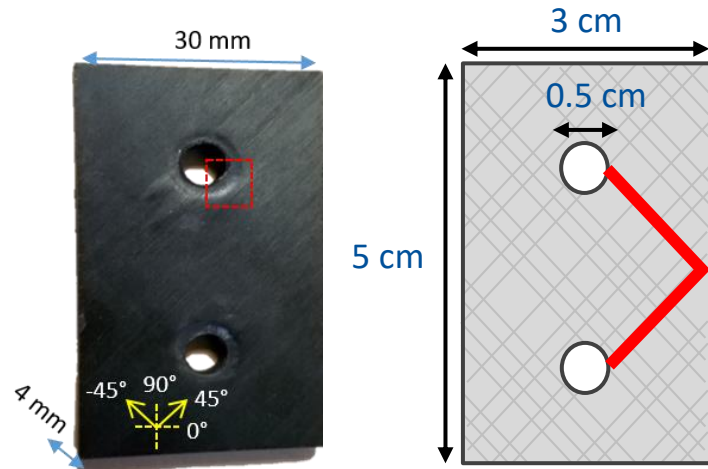


# 3. Mise en œuvre sur banc de laboratoire

## DMAS (ONERA)

### Fabrication des éprouvettes en CFRP

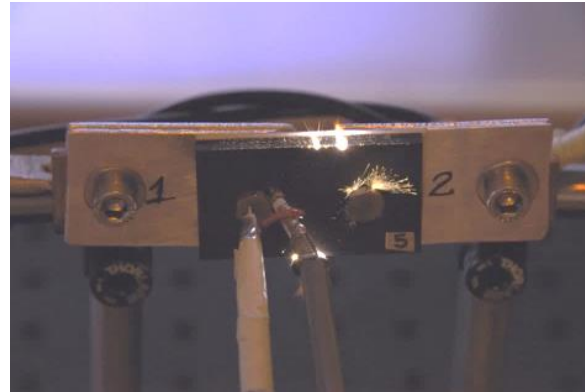
- 16 plis de fibres de carbone (150  $\mu\text{m}$ )
- Résine Epoxy
- 2 points d'injection de courant
- Orientation des fibres  $\pm 45^\circ$



## DPHY (ONERA)

### Expérience de foudroiement

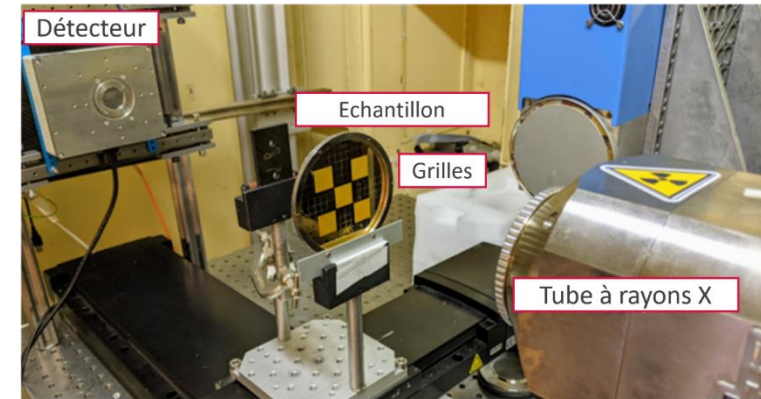
- Courant : 20 kA
- Tension : 200 V



## DIN (CEA List)

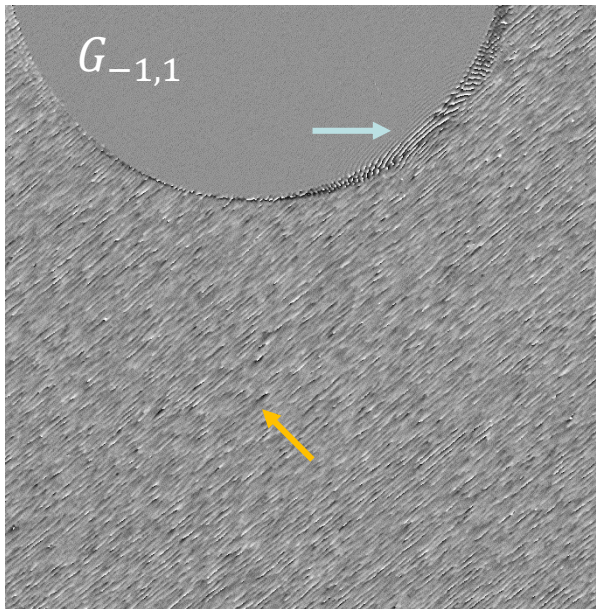
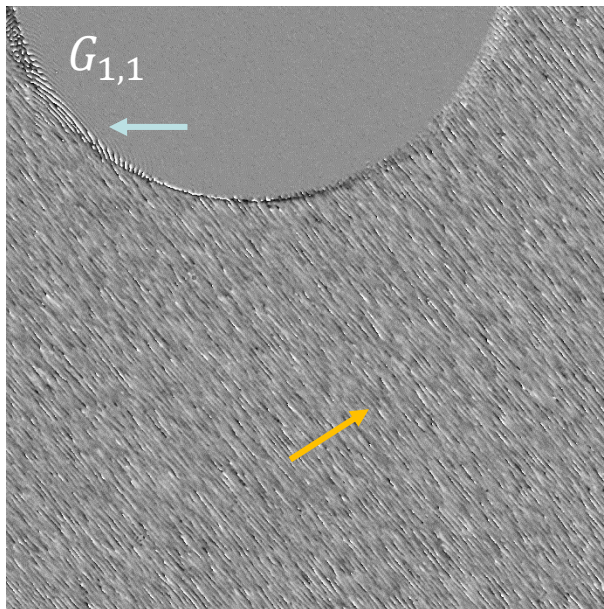
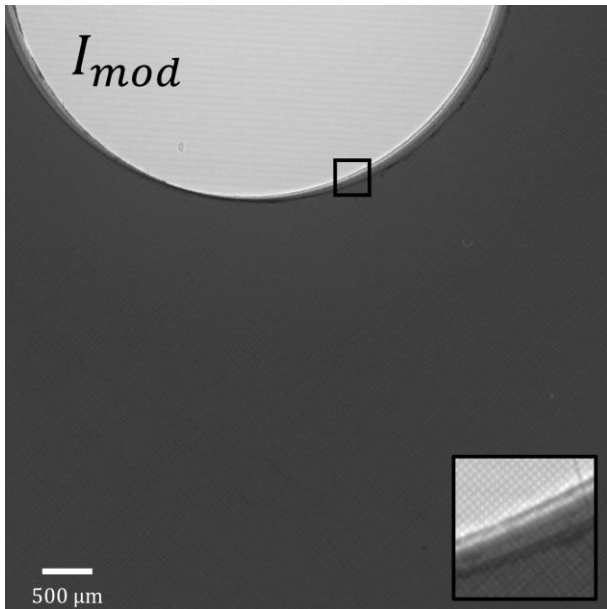
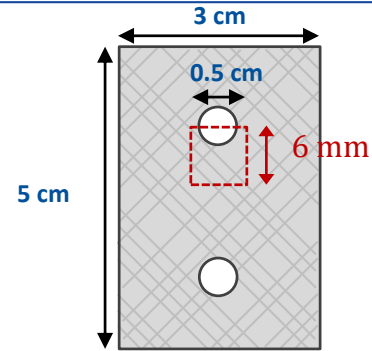
### Diagnostic de la dégradation

- Imagerie d'absorption X
- Imagerie de phase X



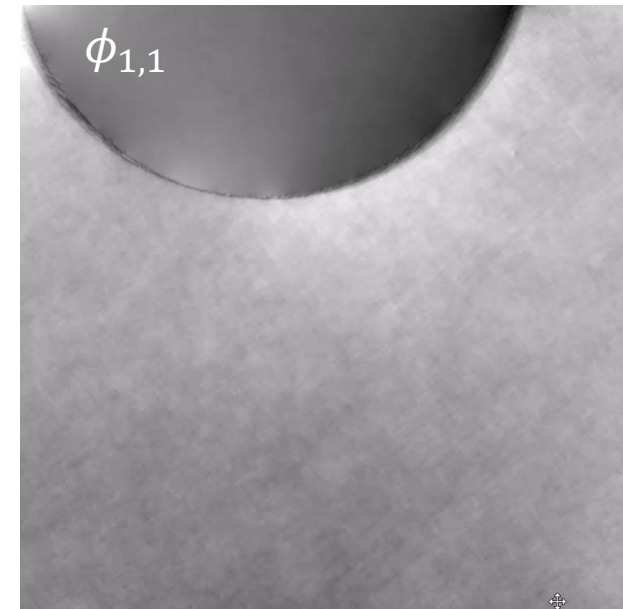
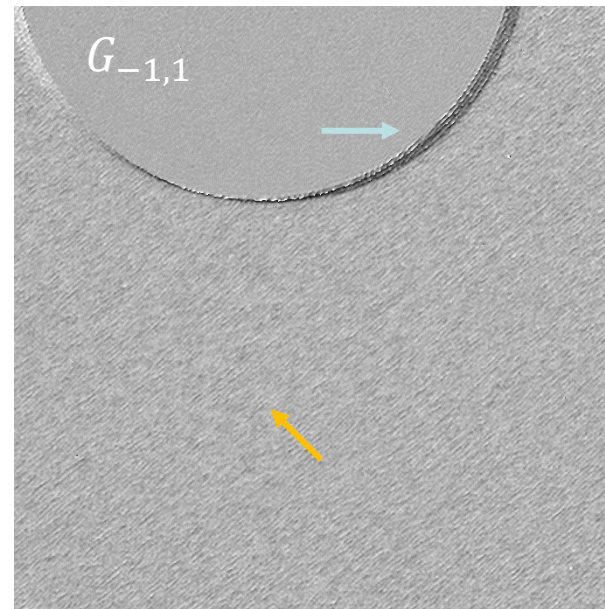
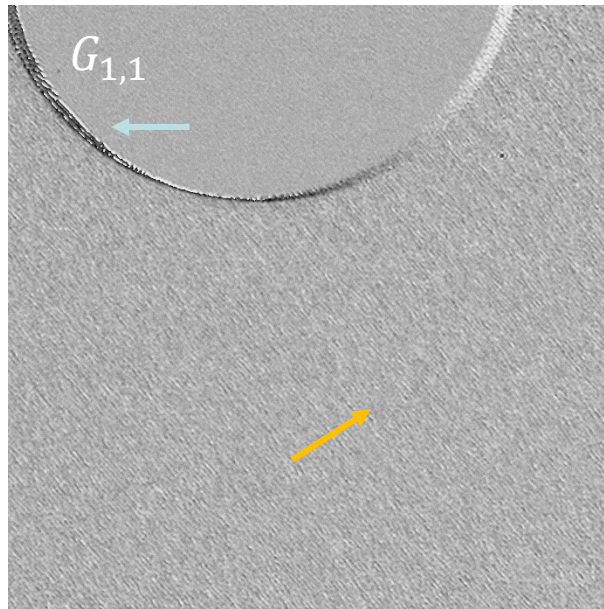
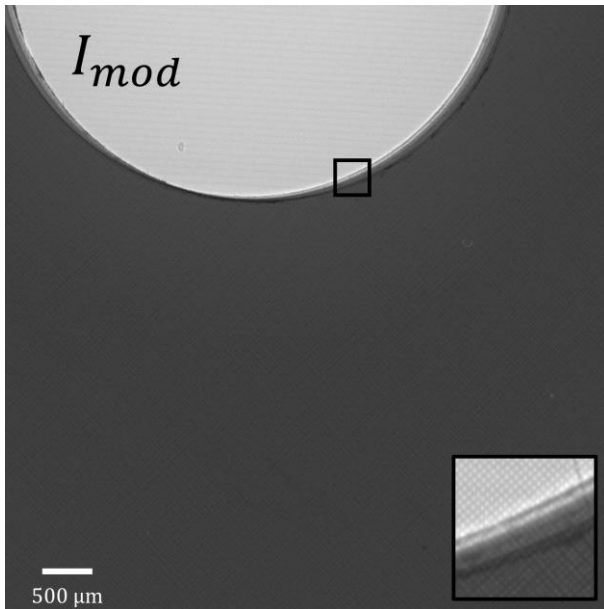
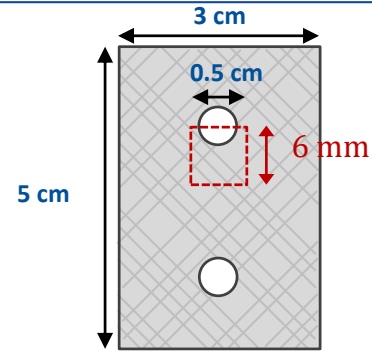
# 3. CFRP de référence

- Sélection d'une zone d'intérêt : point d'injection de courant
- Quel profil de phase de référence ?
- Extraction de phase **sans** MARIO

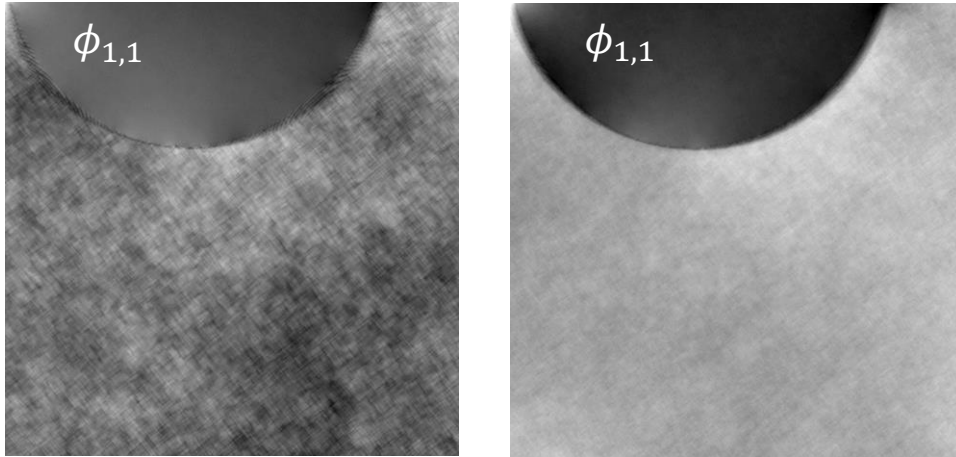


# 3. CFRP de référence

- Sélection d'une zone d'intérêt : point d'injection de courant
- Quel profil de phase de référence ?
- Extraction de phase avec MARIO



# 3. CFRP de référence



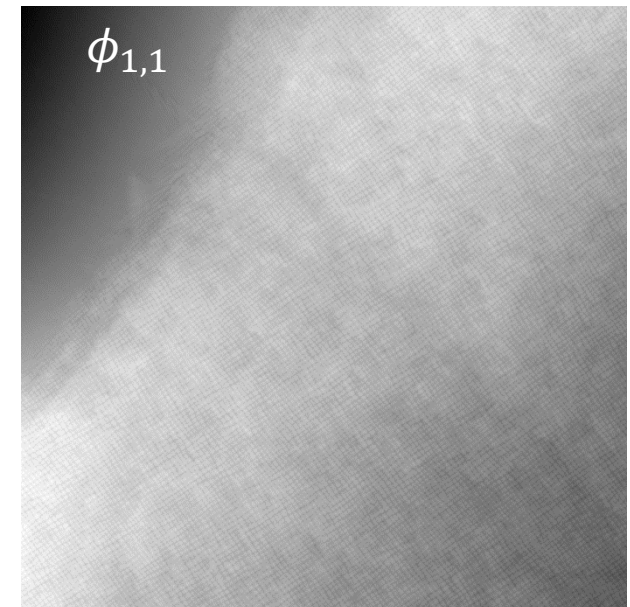
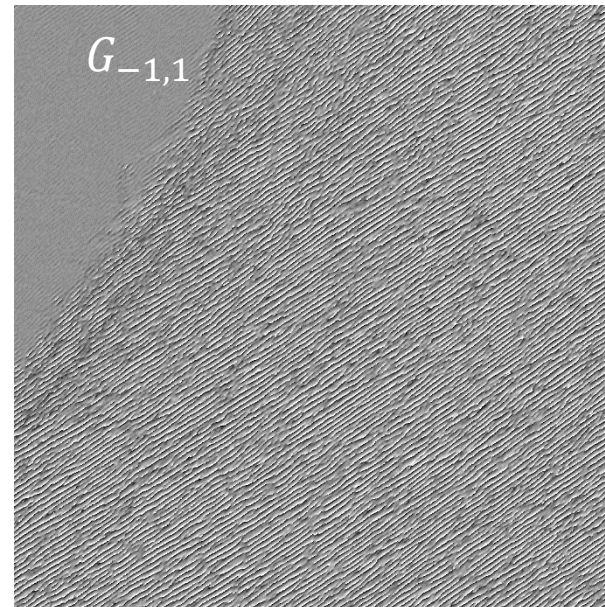
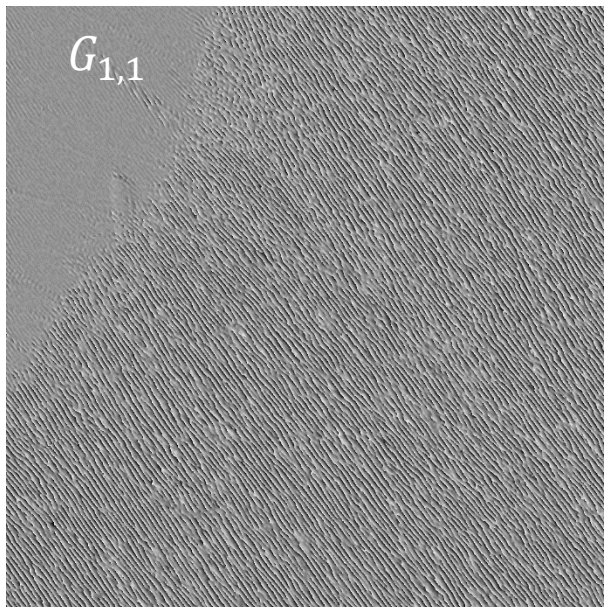
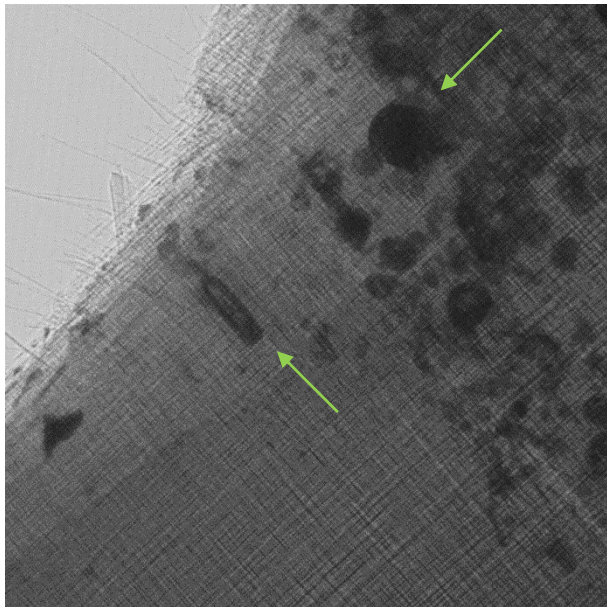
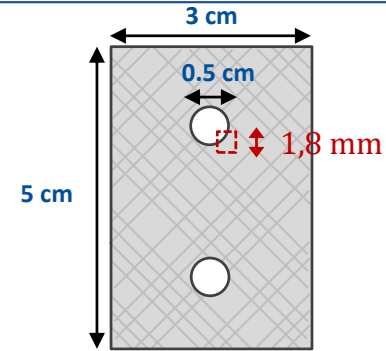
→ Tissage dans l'image de phase  $\neq$  information de phase.  
→ **Tissage = artefacts.**

	Under-sampling alerts $\epsilon_u$ (%)	Dislocation alerts $\epsilon_d$ (%)
Without MARIO	30.8	3.2
With MARIO	0.7	0.2
Gain	44.0	16.0

[1] - Giakoumakis et al., "Artifacts reduction in high-acutance phase images for X-ray grating interferometry", Optics Express, 2022

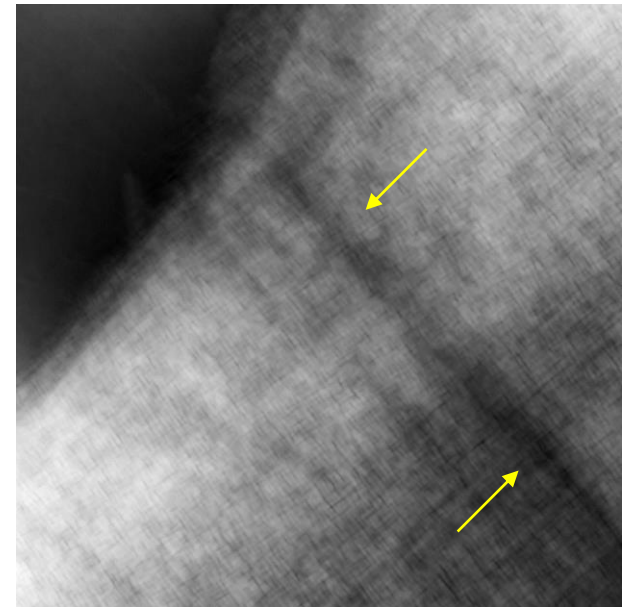
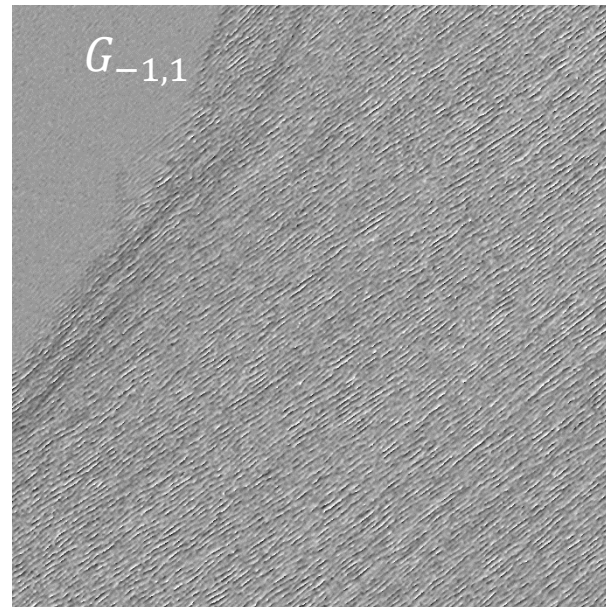
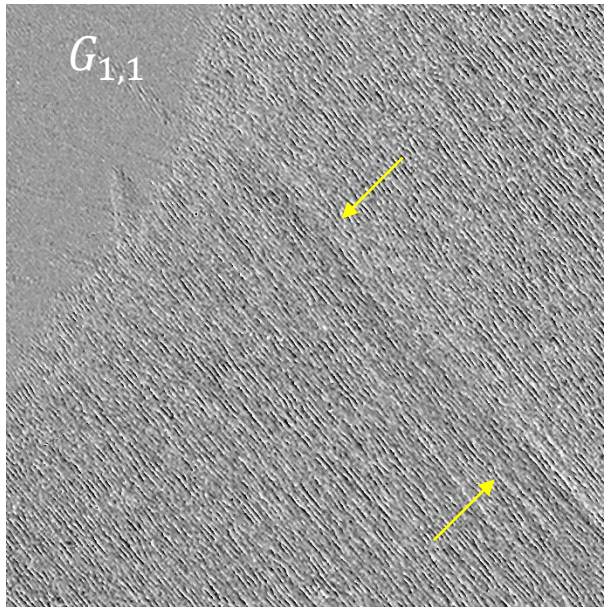
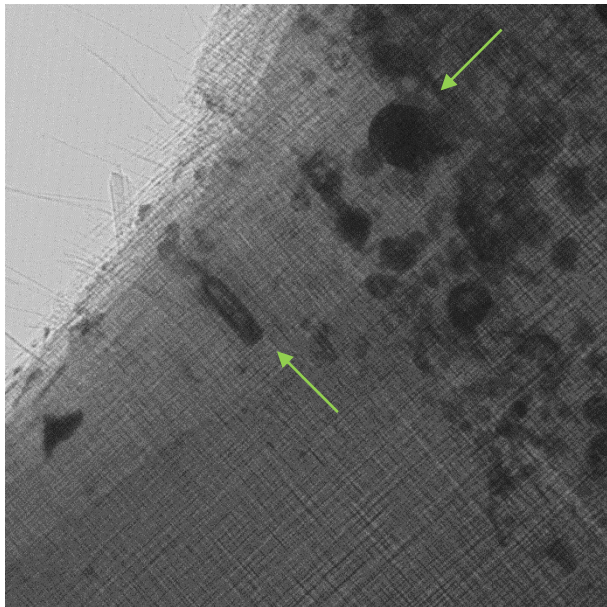
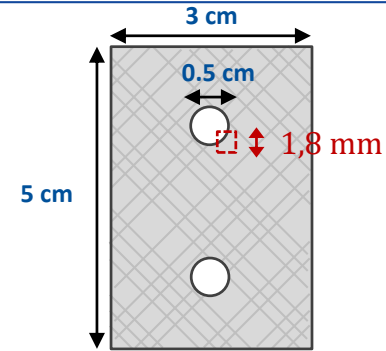
# 3. CFRP foudroyé

- Resserrement de la zone d'intérêt
- Quel nouveau profil de phase après foudroiement ?
- Extraction de phase sans MARIO



# 3. CFRP foudroyé

- Resserrement de la zone d'intérêt
- Quel nouveau profil de phase après foudroiement ?
- Extraction de phase avec MARIO



# 3. CFRP foudroyé

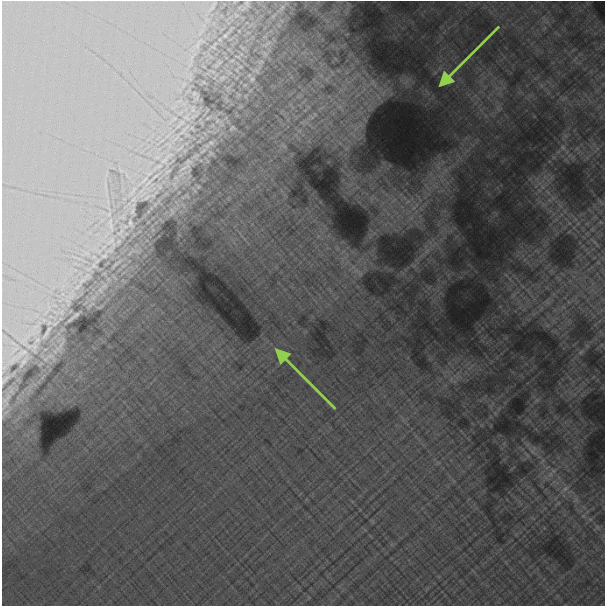


Image d'atténuation

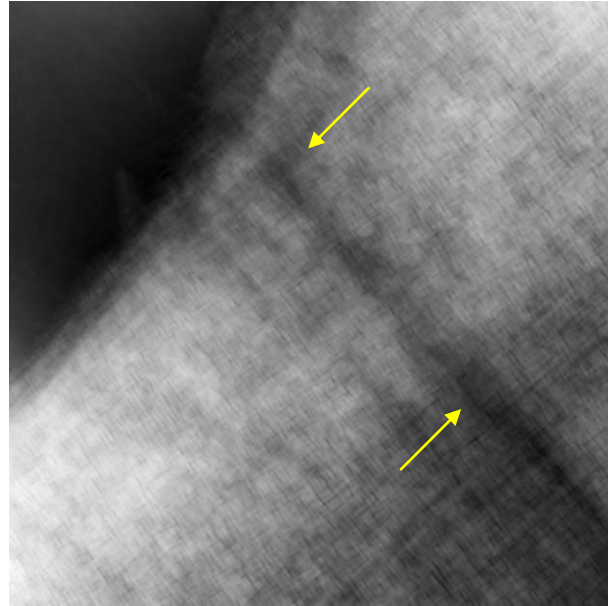


Image de phase (IDML)

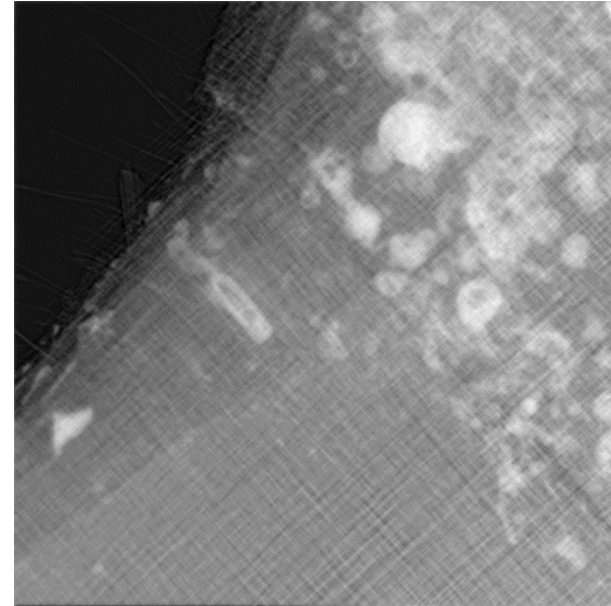


Image de phase (PBI)

D. M. PAGANIN et al. "Simultaneous phase and amplitude extraction from a single defocused image of a homogeneous object". In : Journal of microscopy 206.1 (2002), p. 33-40.

Méthode de Paganin :

$$\phi(x, y) = \frac{\delta}{2\beta} \ln \left( F^{-1} \left[ \frac{F \left[ \frac{I_z}{I_0} \right] (u, v)}{1 + \frac{\lambda z \delta}{4\pi\beta} (u^2 + v^2)} \right] \right)$$



# 3. Imagerie de phase sur source K $\alpha$ laser plasma pulsée

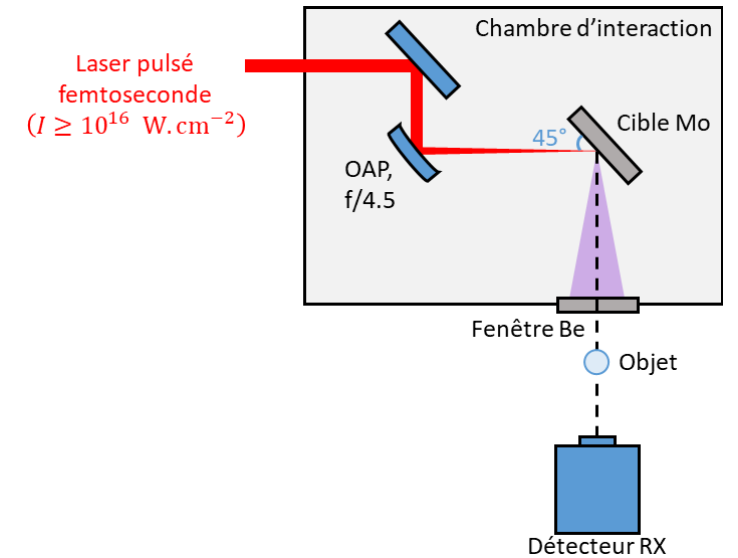
## Contexte

- Développement au LP3 d'une plateforme laser femto-seconde pour l'imagerie.
- Performances laser: 10/20 TW – 10/100 Hz – 500/250 mJ – 5/25W – 25 fs.



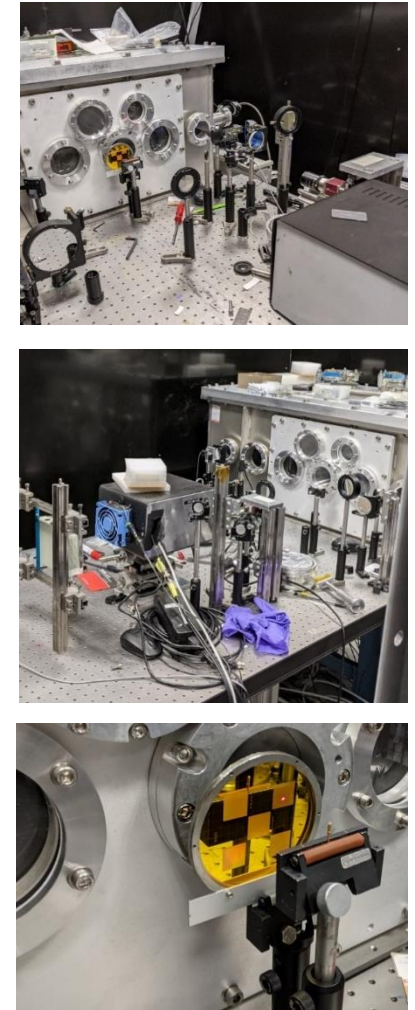
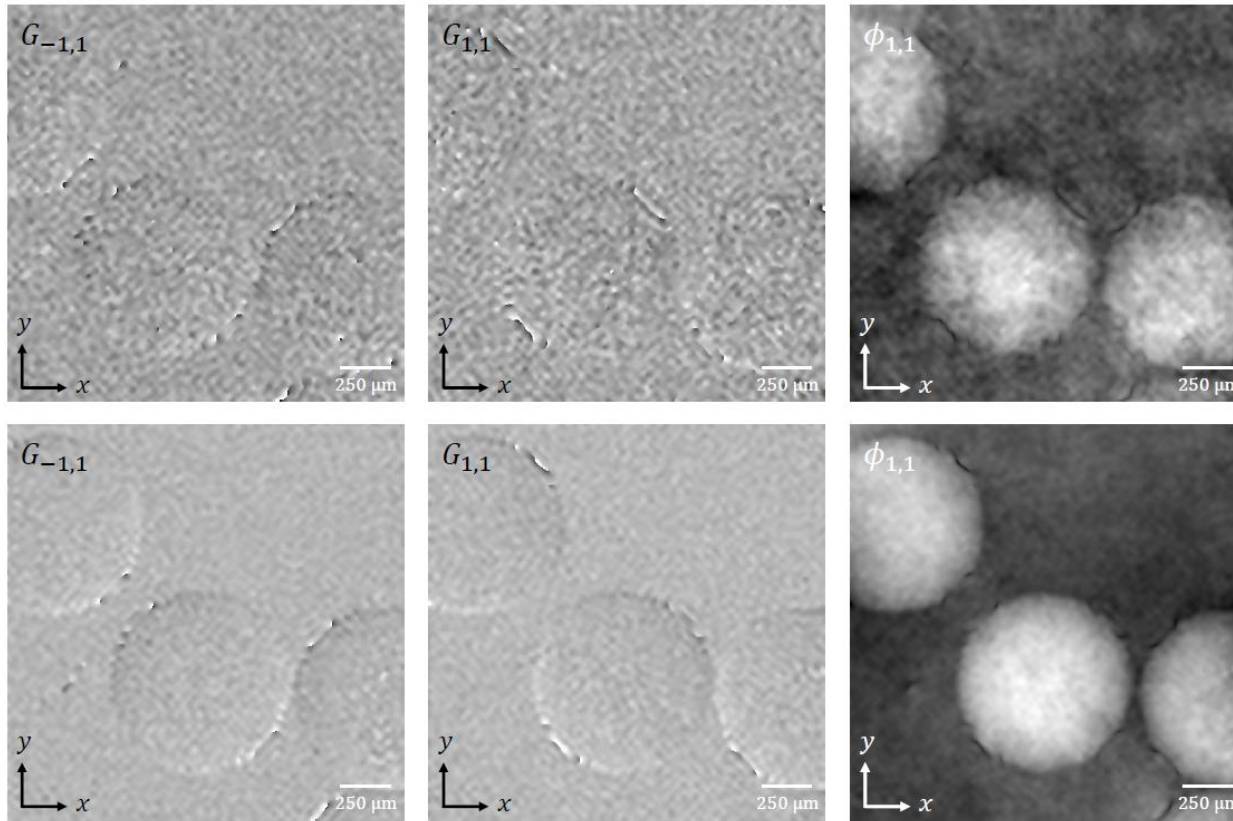
## Objectif scientifique

- Imagerie de phase dynamique.



# 3. Imagerie de phase sur source laser plasma pulsée

- Imagerie de phase sur  $K\alpha$  et MARIO : affaire à suivre ...



[4] Ferré, Giakoumakis, et al., " Quantitative phase contrast imaging using laser-based  $K\alpha$  X-ray source with single 2D-grating", Optics. Letters., 2023 (submitted)

# En conclusion

## *Stratégie corrective :*

- Méthode d'identification d'artéfacts : CDC
- Méthodes correctives : MARIO & MMCP  
⇒ Quantification des gains expérimentaux

## *En pratique :*

- Dimensionnement d'un banc expérimental d'IDML en rayons X → Tomographie de phase X
- Aspect simulation : modèle ondulatoire → CIVA

## *Le plus important :*

- Ne pas mettre sa main devant la source RX ...





**Merci pour votre  
attention !**

# Session 5: Contrôle Non Destructif & Caractérisation

*Chairman : Adrien Stolidi*

- *Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase par rayons X. **Georges Giakoumakis**, ONERA*
- *Imagerie de phase par IDML sur source de rayons X laser-Plasma. **Amélie Ferré**, LP3*
- *Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude de l'interaction laser – matière. **Laurent Gallais**, Institut Fresnel*
- *Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie. **Aurélien Houard**, LOA*

# Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude l'interaction laser / matière

L. Gallais, S. Monneret

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Méditerranée

[laurent.gallais@fresnel.fr](mailto:laurent.gallais@fresnel.fr)

Première Rencontre pour  
l'Interférométrie à Décalage  
MultiLatéral, 11 & 12 Mai 2023, Saclay



# Contexte

## Interaction laser matière

### Thématiques de recherche

- Physique de l'interaction laser / matière
- Endommagement laser des composants optiques
- Développement de procédés laser



**Imagerie de phase** : Outil pour comprendre la réponse du matériau et les mécanismes de transformation de la matière sous flux laser intense

- Variations d'indice
- Variations d'épaisseur
- En volume ou en surface
- In situ ou ex situ
- Post-mortem ou temps réel

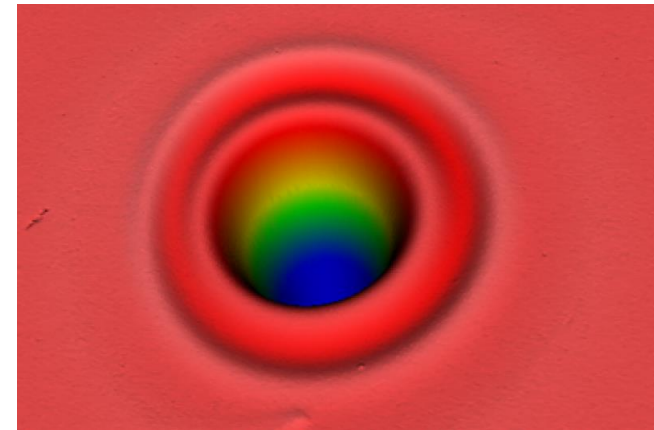
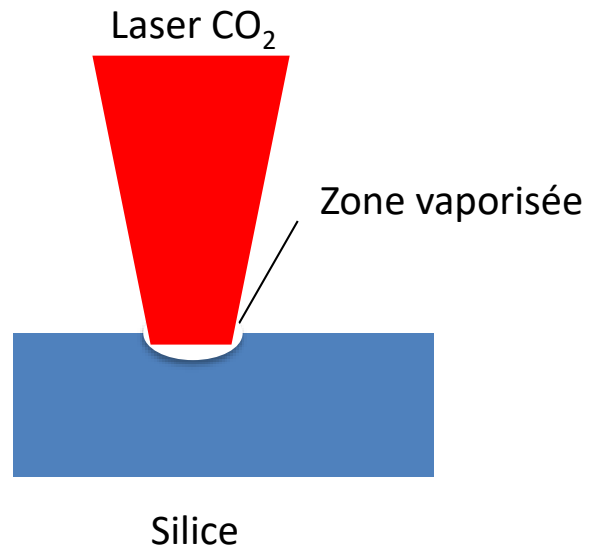
# Plan de la présentation

- Topographie de sites micro-usinés par laser
- Mesures de biréfringence locale
- Détection et analyse de l'endommagement laser
- Mesures d'effets transitoires



# Topographie de sites micro-usinés par laser

Présentation de la problématique

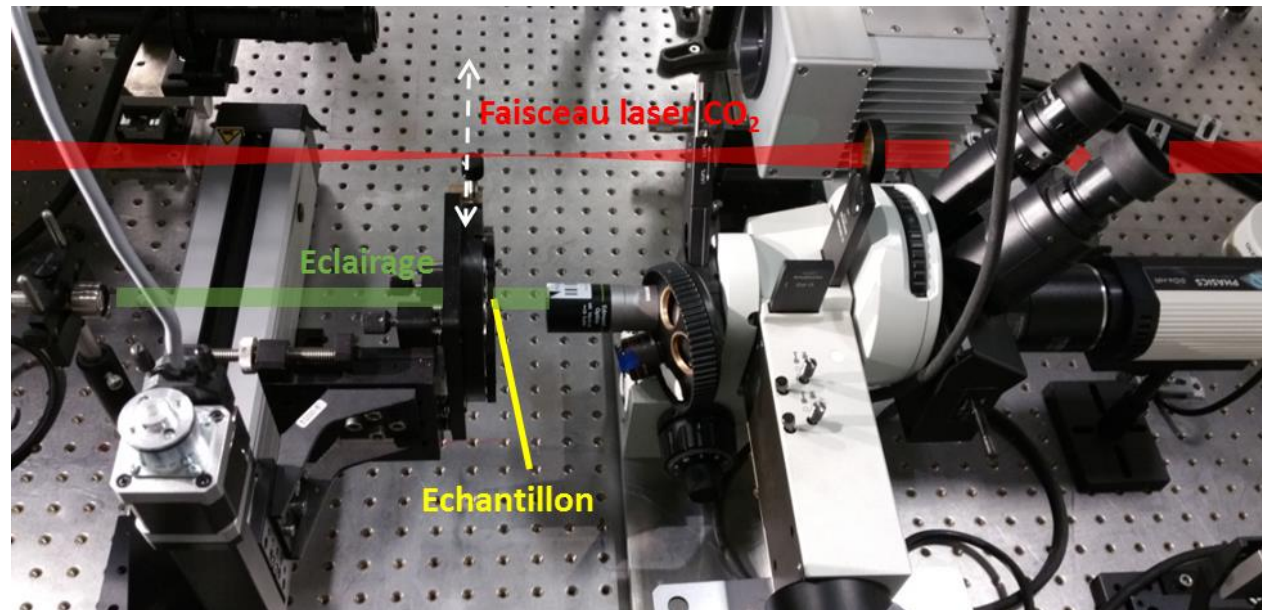


*Exemple d'une mesure au profilomètre optique (Zygo Newview)*

Mesures in situ de la topographie des cratères d'ablation?

# Topographie de sites micro-usinés par laser

## Configuration expérimentale

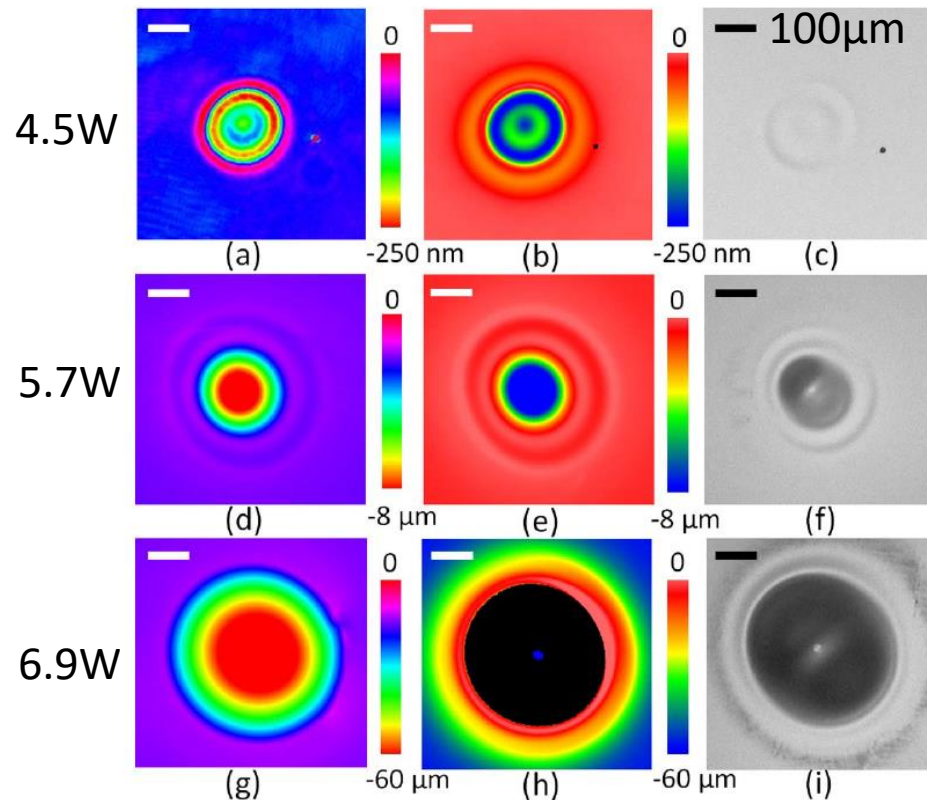


*Configuration pour la mesure de front d'onde*

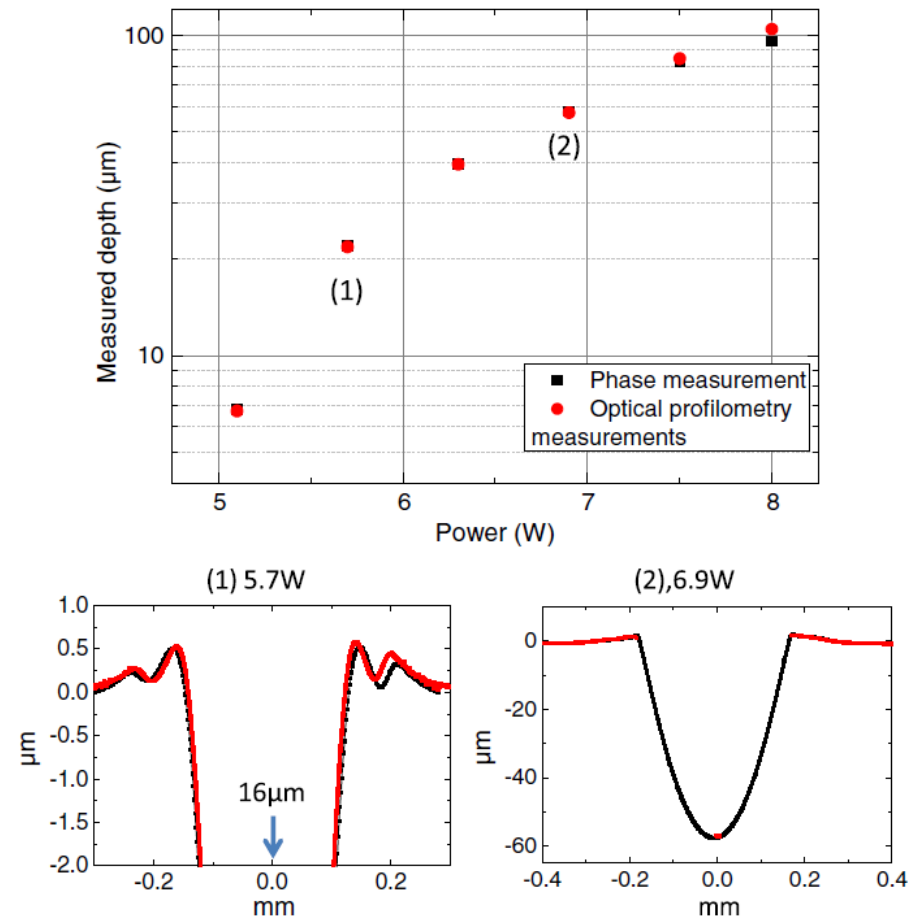
# Topographie de sites micro-usinés par laser

## Résultats

Topographies de surface obtenues par  
SID4 / Zygo / Microscopie



Comparaison des profondeurs mesurées :

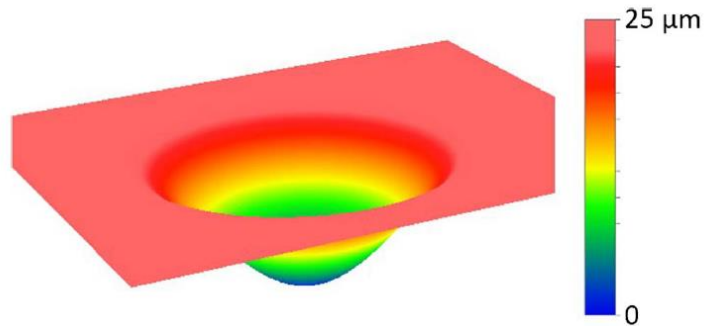


D.B. Douti, M. Chrayteh, S. Aknoun, T. Doualle, C. Hecquet, S. Monneret, L. Gallais, 'Quantitative phase imaging applied to laser damage detection and analysis', *Appl. Opt.* 54, 8375 (2015)

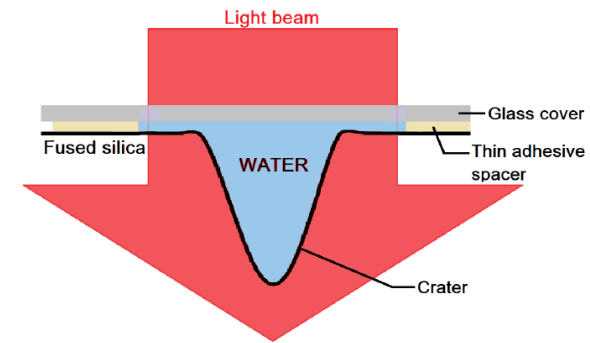
# Topographie de sites micro-usinés par laser

Exemple d'application: mesure de  $dn/dT$  de liquides

Cratère d'ablation



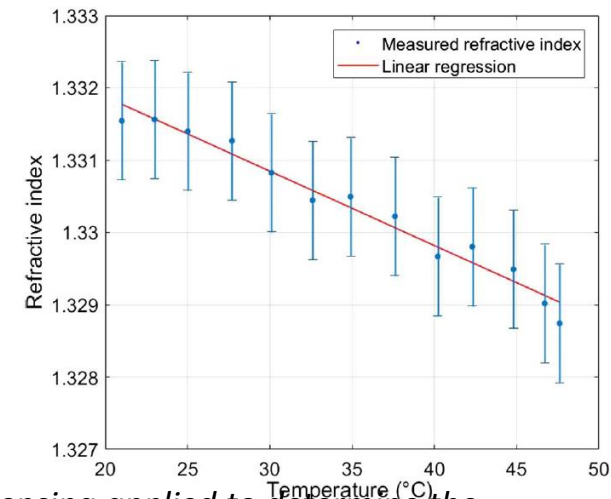
Configuration pour la mesure



Mesure de déphasage



Mesure du  $dn/dT$  de l'eau

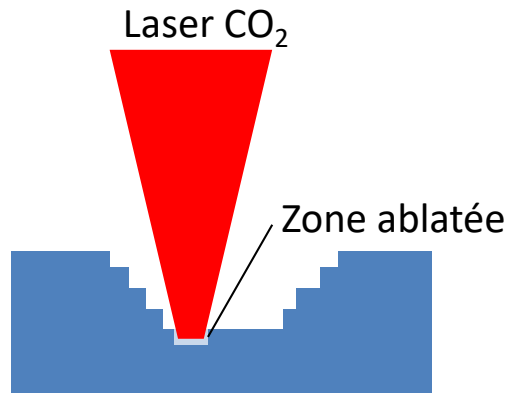


R. Radhakrishnan, L. Gallais, S. Monneret, 'Wavefront sensing applied to determine the temperature dependence of the refractive index of liquids', *Appl. Opt.* 58, 3646 (2019)

# Topographie de sites micro-usinés par laser

## Présentation de la problématique

*Procédé laser ablatif pour le micro-usinage de la silice*



*Exemple d'un cône usiné à la surface d'un verre de silice*

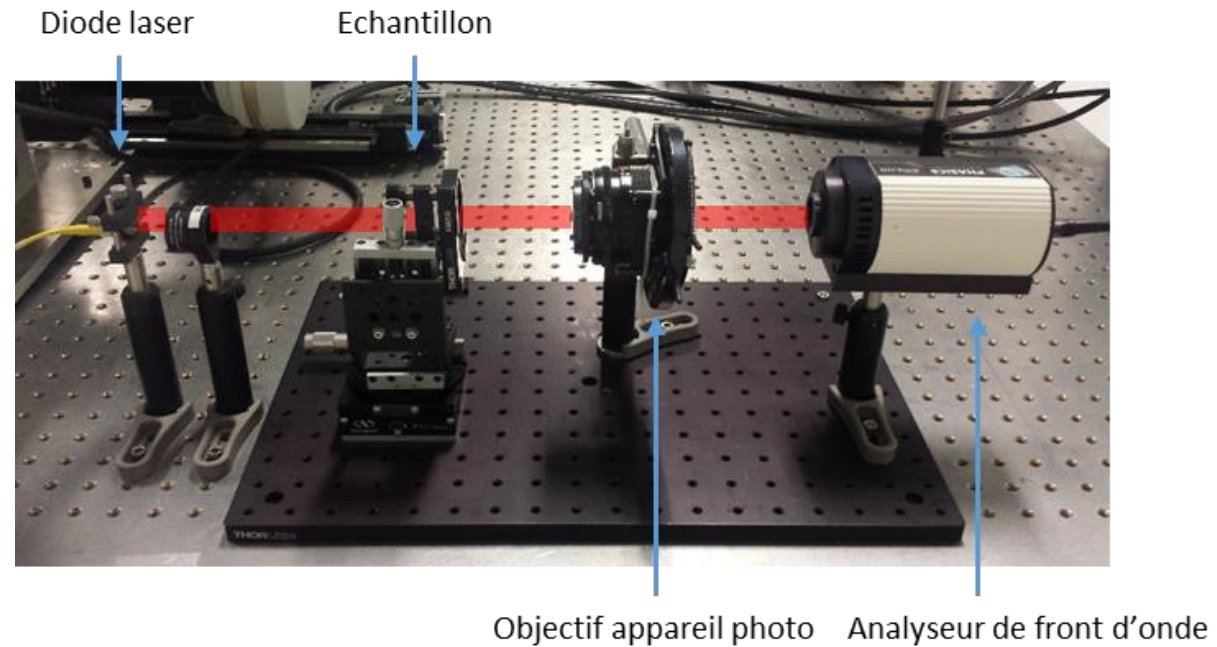


Mesures rapides de la topographie des sites microusinés?

- profilomètre mécanique => ~ heure
- profilomètre optique => pente trop raide

# Topographie de sites micro-usinés par laser

## Configuration expérimental

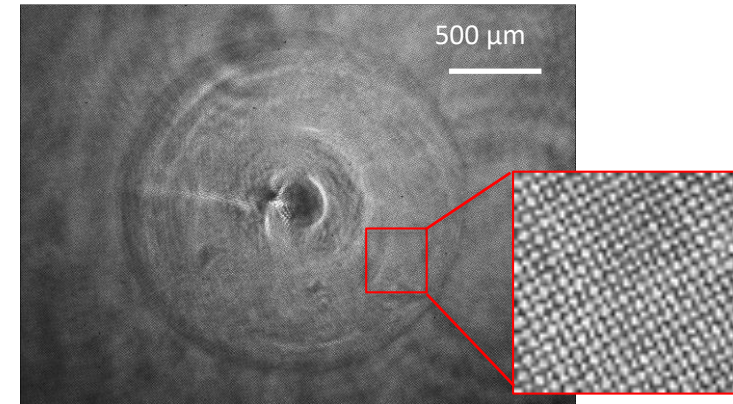
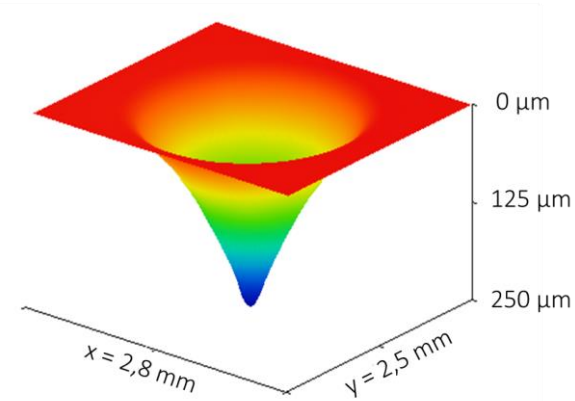


*Configuration pour la mesure de front d'onde*

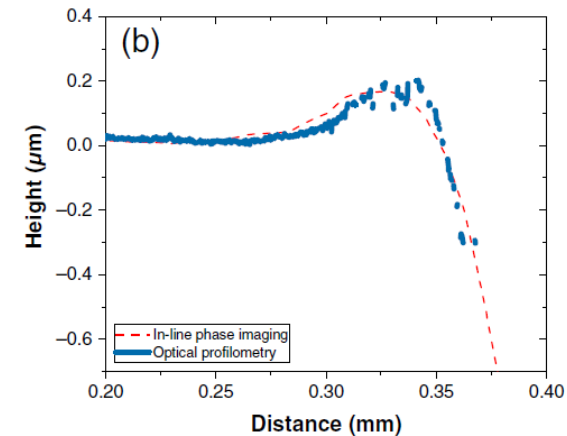
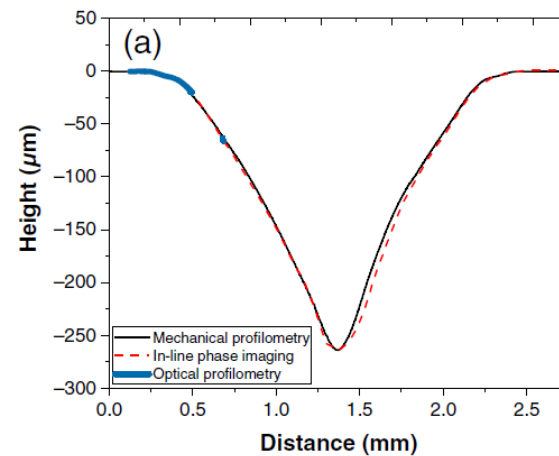
# Topographie de sites micro-usinés par laser

## Résultats

*Measurement of a conical crater in a fused silica sample*



*Comparison of profile measurements obtained with:*  
*-Dektak stylus profilometer*  
*-Zygo Newview*  
*-SID4*



*T. Doualle, L. Gallais,, S. Monneret, S. Bouillet, A. Bourgeade, C. Ameil, L. Lamaignère, P. Cormont, 'CO<sub>2</sub> laser microprocessing for laser damage growth mitigation of fused silica optics', Opt. Engin. 56, 011022 (2017)*

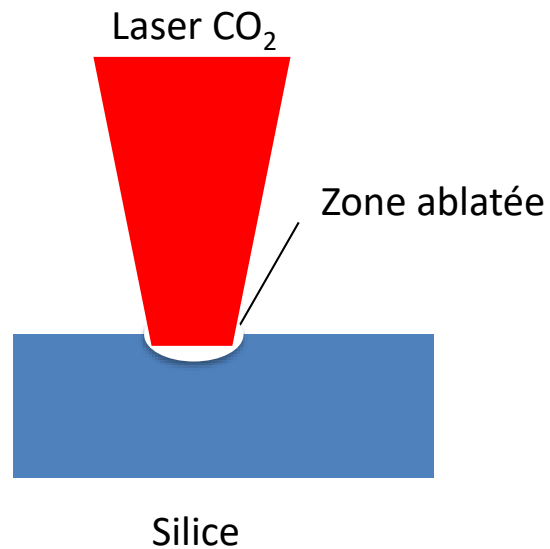
# Plan de la présentation

- Topographie de sites micro-usinés par laser
- Mesures de biréfringence locale
- Détection et analyse de l'endommagement laser
- Mesures d'effets transitoires

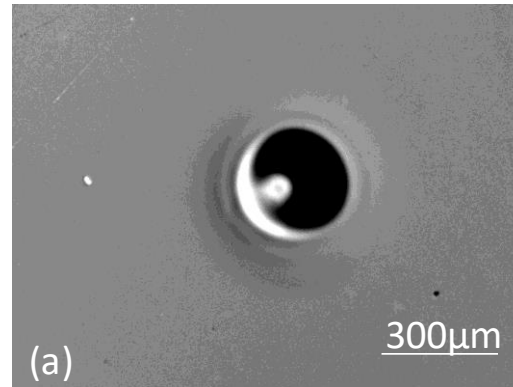


# Mesure de biréfringence

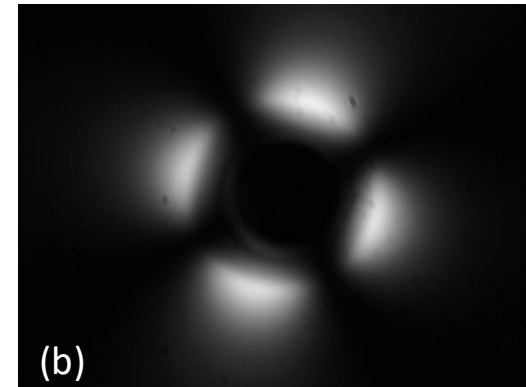
## Problématique



*Cratère d'ablation  
observe au microscope  
fond clair*



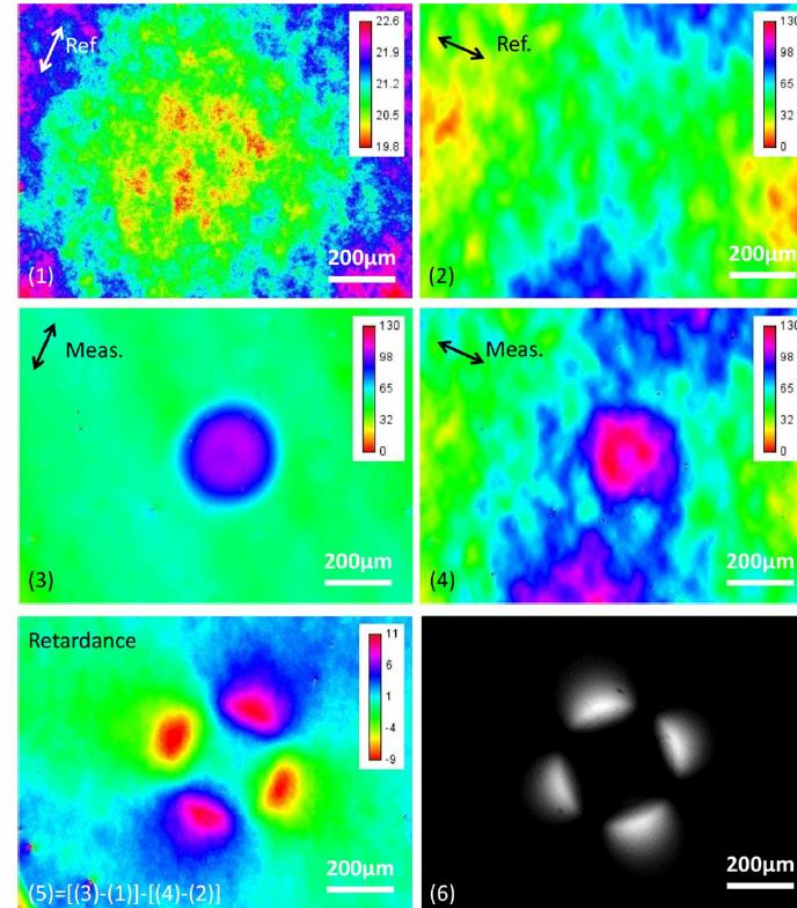
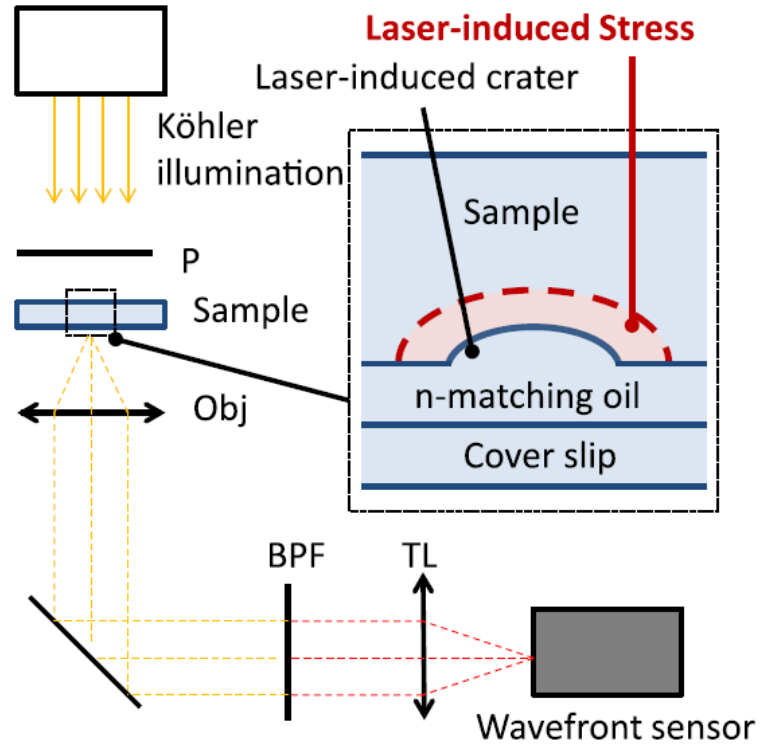
*Observation entre  
polariseurs croisés*



Evaluer les contraintes thermo-mécaniques générées par les procédés d'usinage laser de la silice?

# Mesure de biréfringence

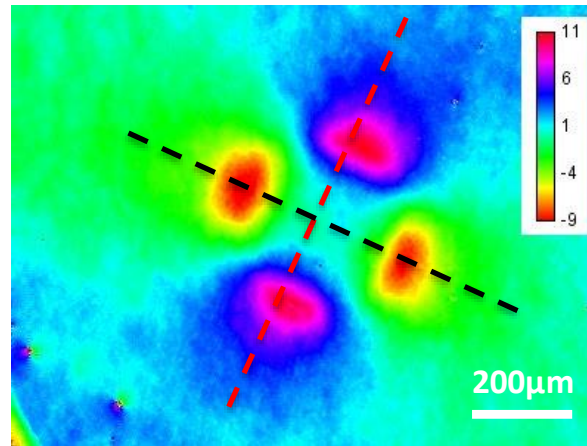
## Configuration expérimentale



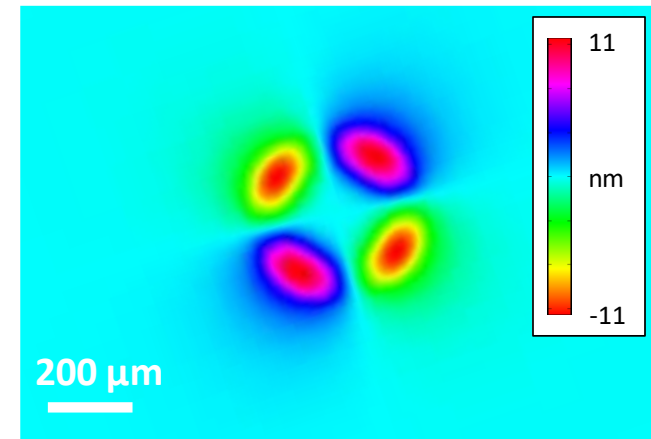
# Mesure de biréfringence

## Résultats

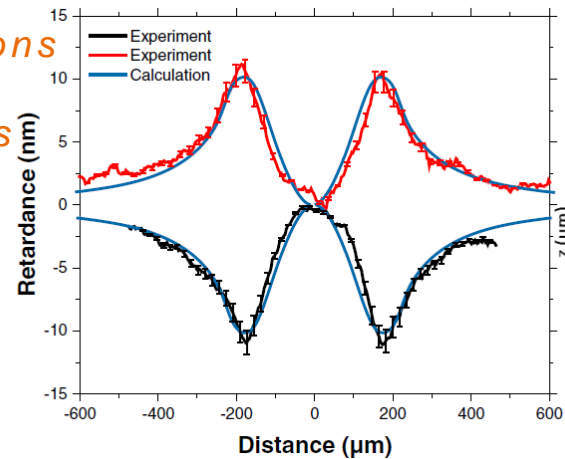
Mesure de déphasage



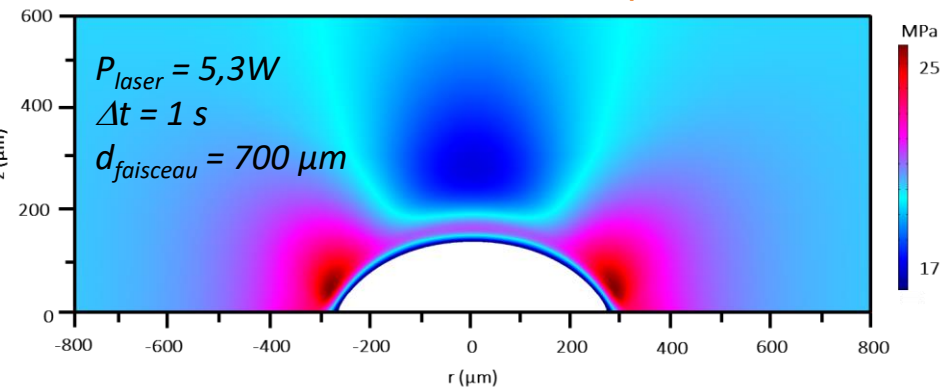
Simulation du déphasage à partir d'un modèle thermomécanique



Comparaisons  
simus /  
expériences



Simulation de l'amplitude des  
contraintes thermomécaniques



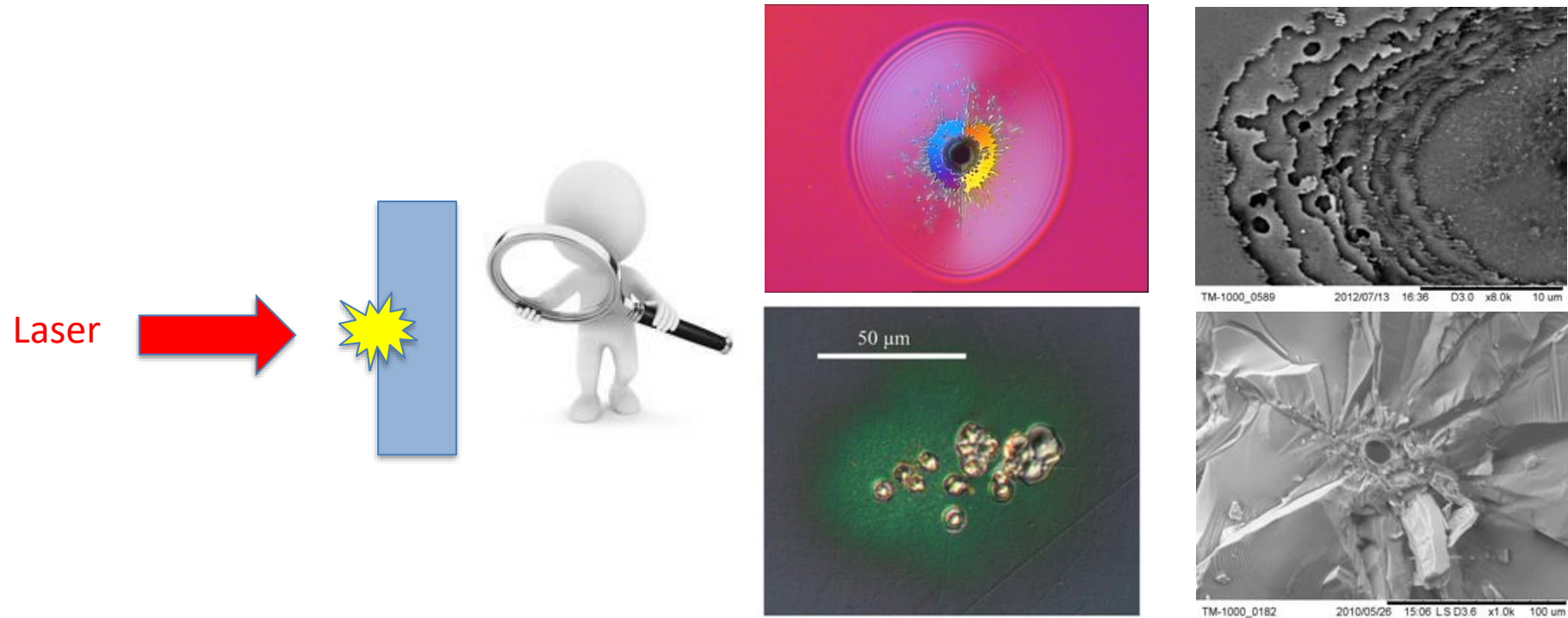
T. Doualle, A. Ollé, P. Cormont, S. Monneret, L. Gallais, 'Laser-induced birefringence measurements by quantitative polarized-phase microscopy', *Opt. Lett.* 42, 1616 (2017)

# Plan de la présentation

- Topographie de sites micro-usinés par laser
- Mesures de biréfringence locale
- Détection et analyse de l'endommagement laser
- Mesures d'effets transitoires

# Détection et analyse de l'endommagement laser

## Problématique

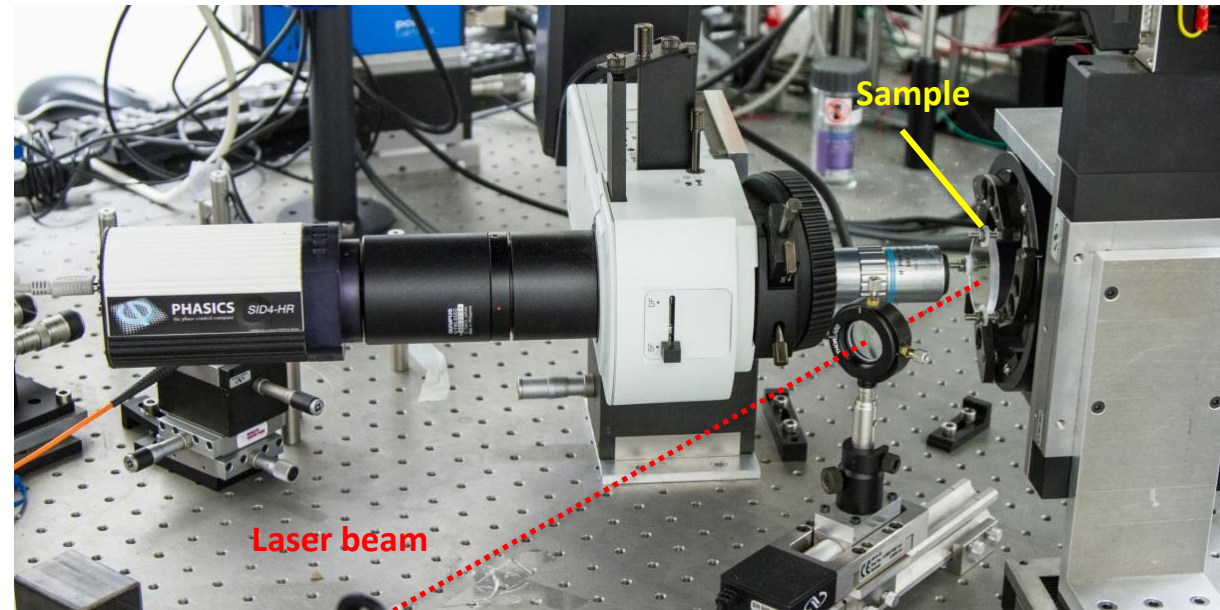


⇒ Détecter le plus finement possible les modifications induites par un laser de puissance sur un composant optique

- In situ
- Info quantitative

# Détection et analyse de l'endommagement laser

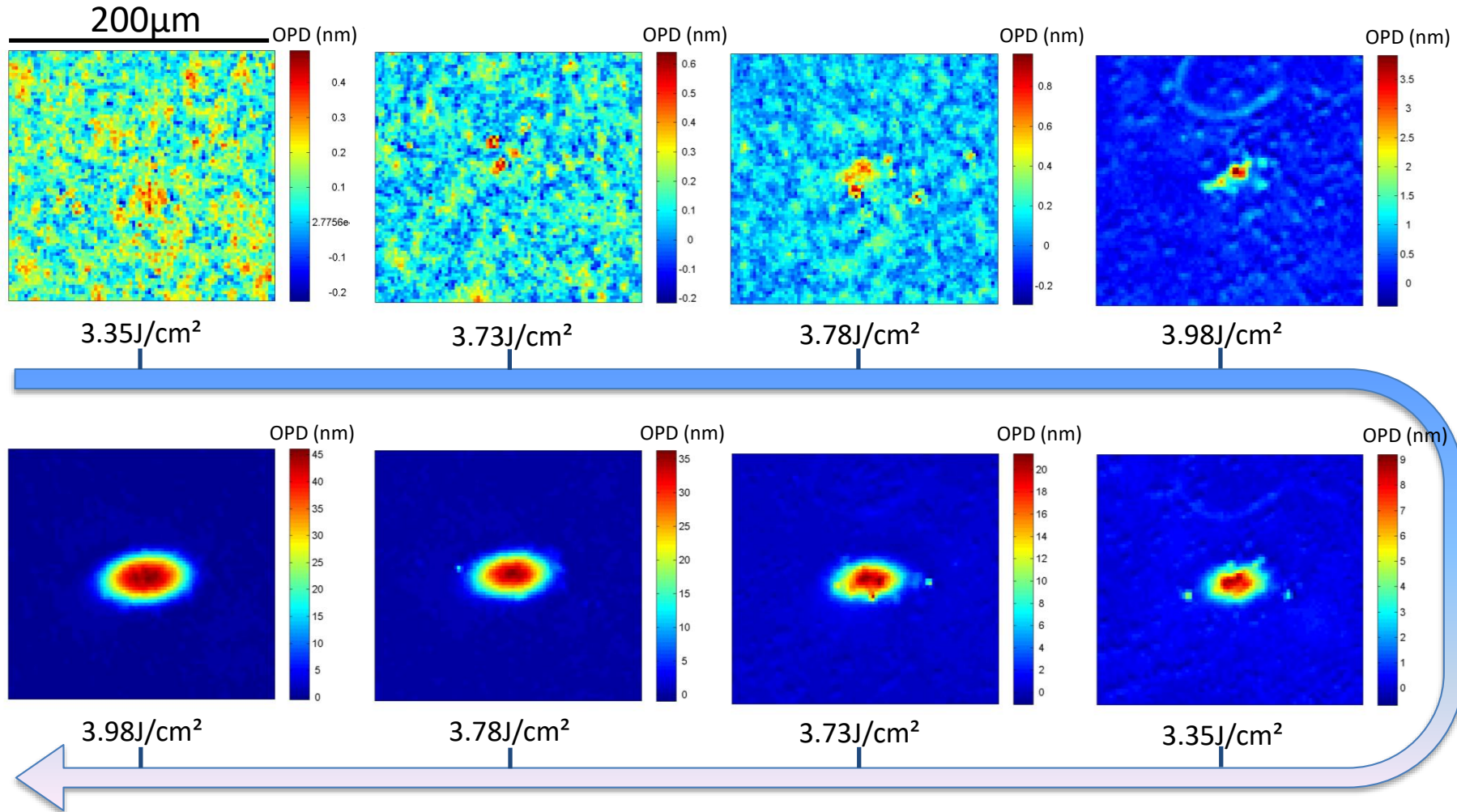
## Configuration



*Example of an experimental configuration for observation in reflection mode with white light illumination.*

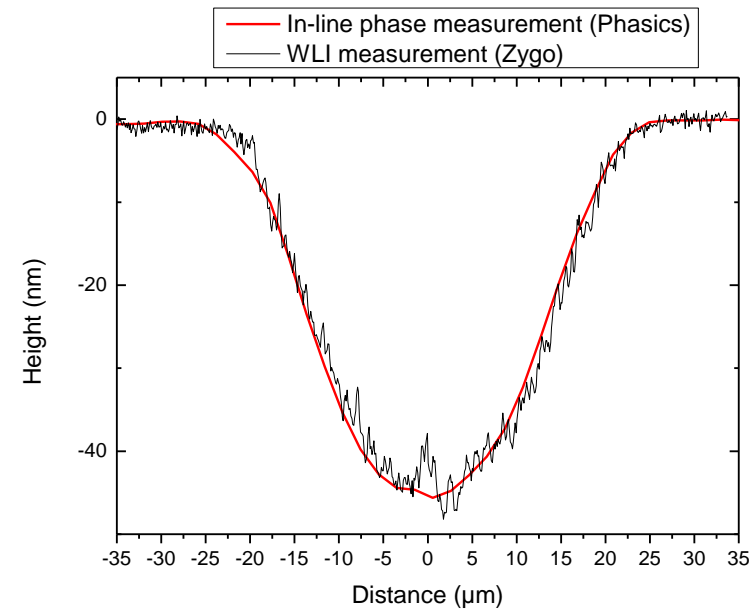
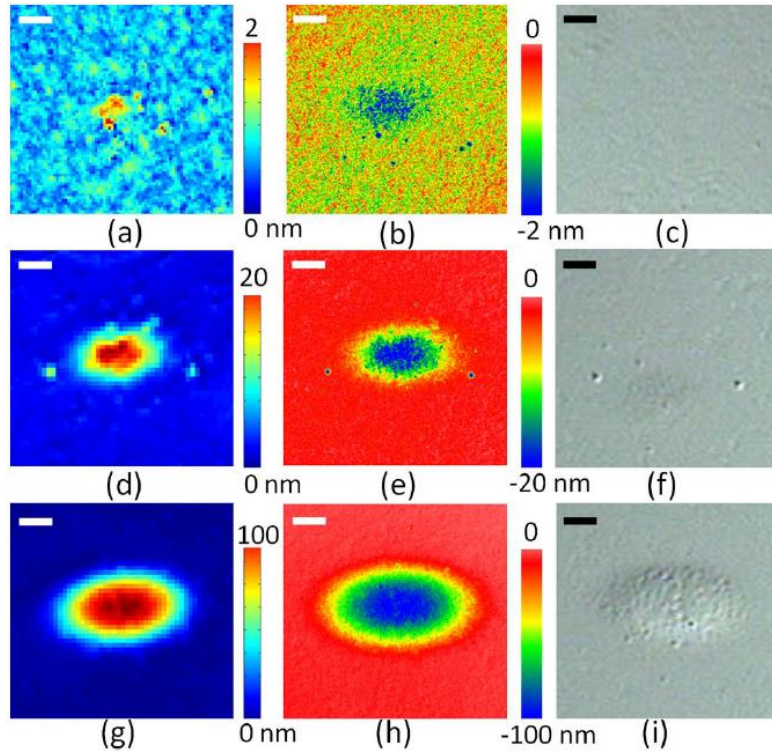
# Détection et analyse de l'endommagement laser

Fused silica substrate, single pulses, 550fs, 1030nm



# Détection et analyse de l'endommagement laser

## Résultats



*D.B. Douti, M. Chrayteh, S. Aknoun, T. Doualle, C. Hecquet, S. Monneret, L. Gallais, 'Quantitative phase imaging applied to laser damage detection and analysis', Appl. Opt. 54, 8375 (2015)*

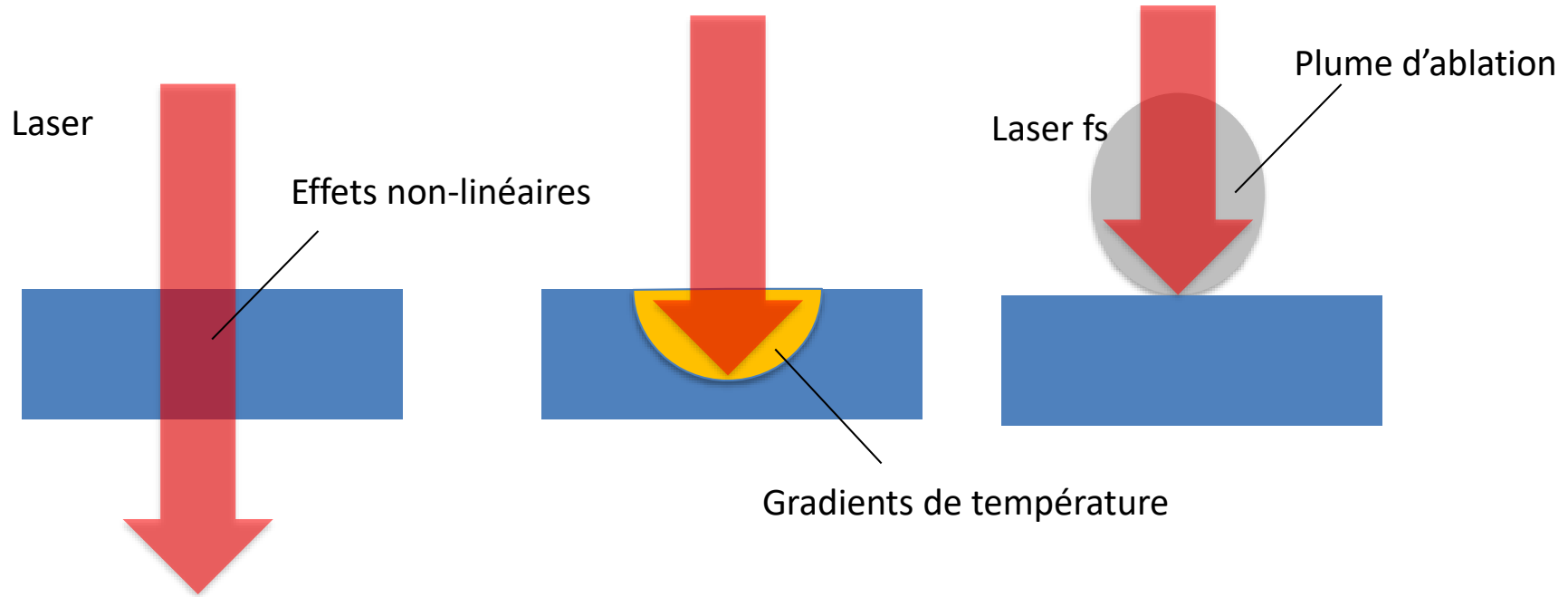


# Plan de la présentation

- Topographie de sites micro-usinés par laser
- Mesures de biréfringence locale
- Détection et analyse de l'endommagement laser
- Mesures d'effets transitoires

# Mesures d'effets transitoires

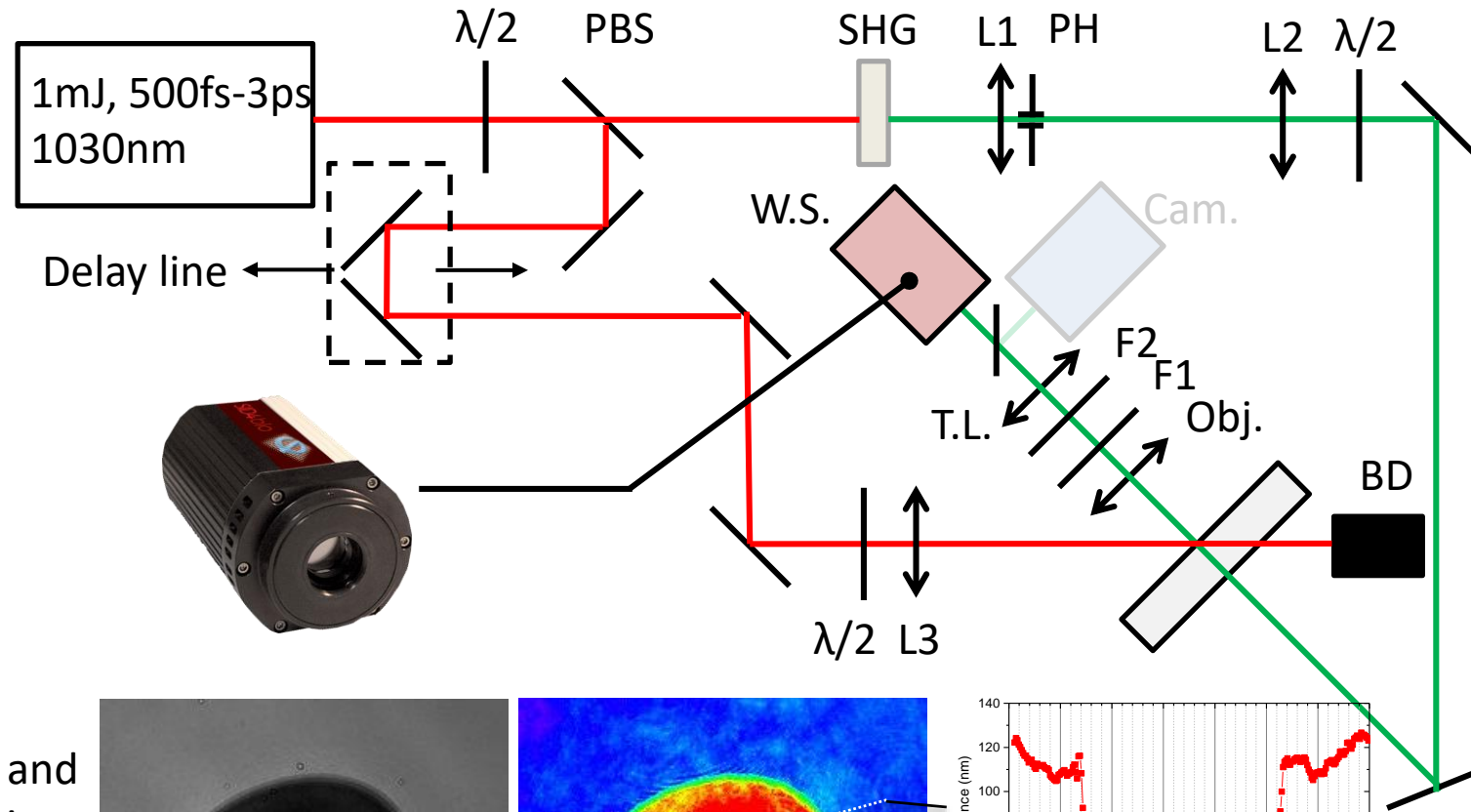
## Problématique



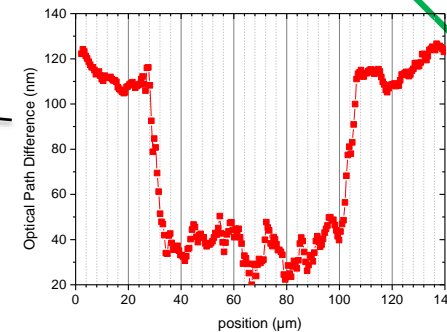
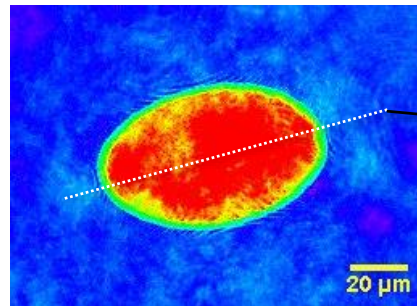
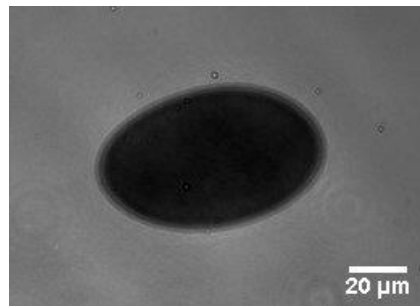
⇒ Mesurer les effets induits dans les matériaux optiques soumis à de forts flux lasers (variations d'indice)

# Mesures d'effets transitoires

## Configuration expérimentale



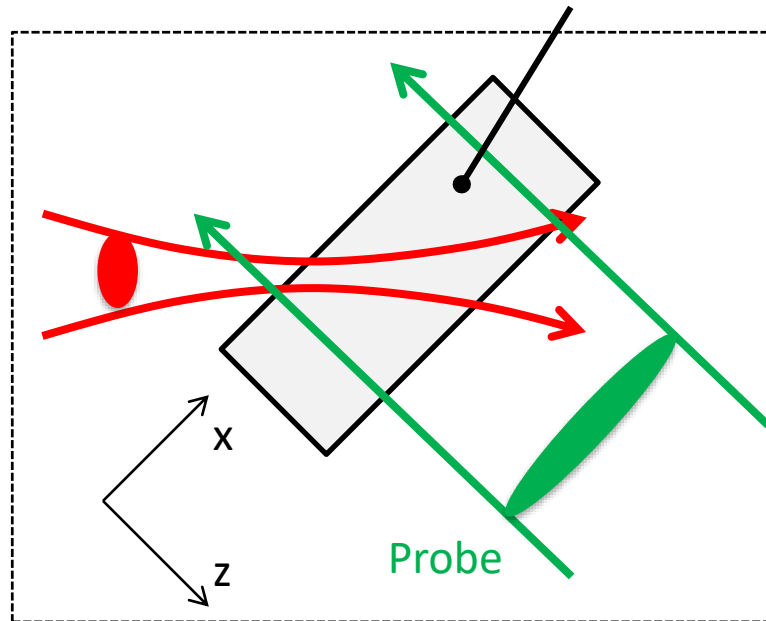
Intensity and  
quantitative  
phase image



# Time-resolved phase imaging

Non-linear Kerr effect in fused silica

Fused silica sample  
(50mm diameter, 5mm thick)  
LIDT =  $10.5 \pm 0.5 \text{ J/cm}^2$

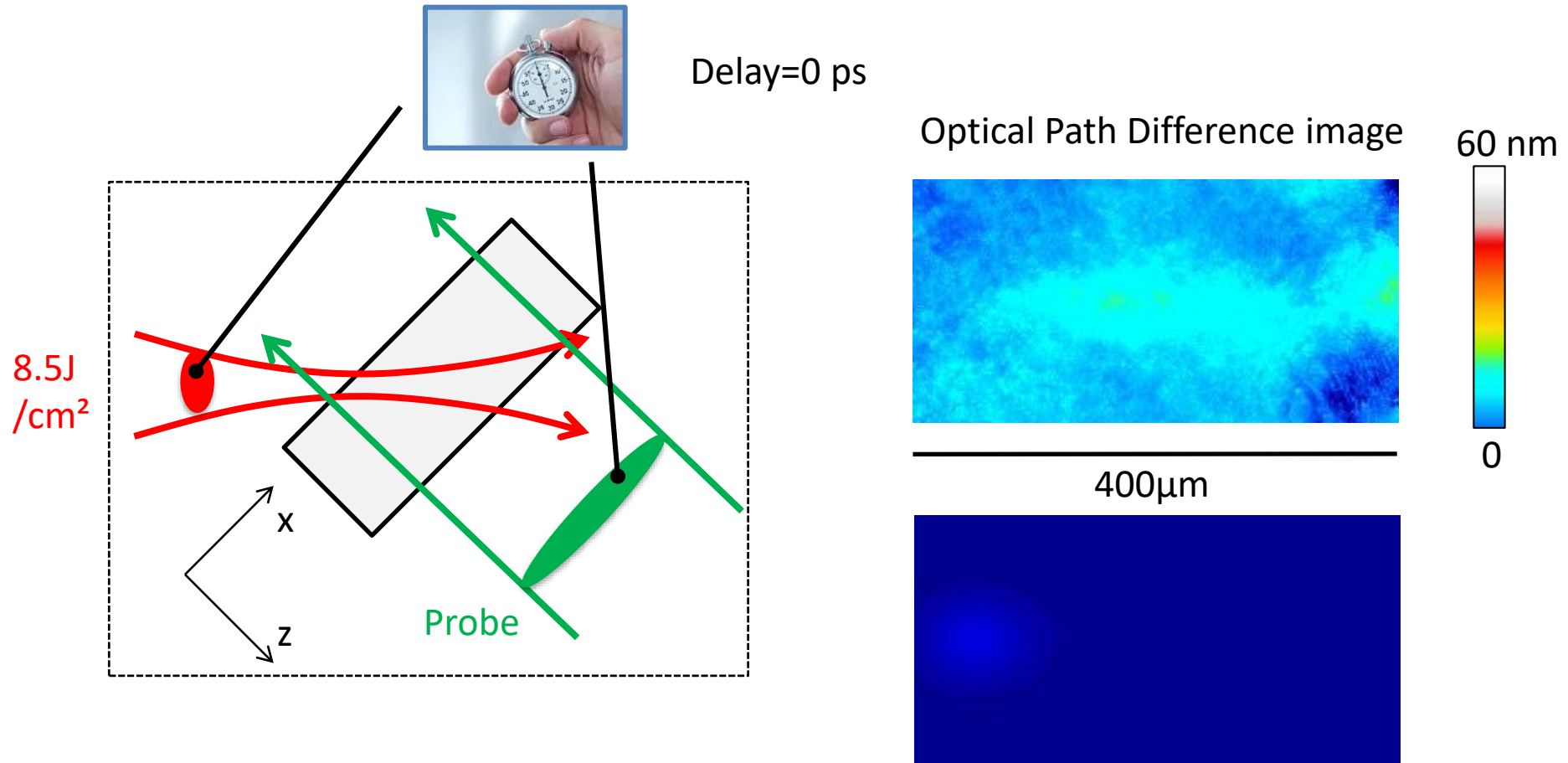


Pump beam  
1030nm, 1ps, S  
Diameter  $\approx 100\mu\text{m}$

Probe beam  
515nm, 1ps  
Diameter  $> 1\text{mm}$

# Time-resolved phase imaging

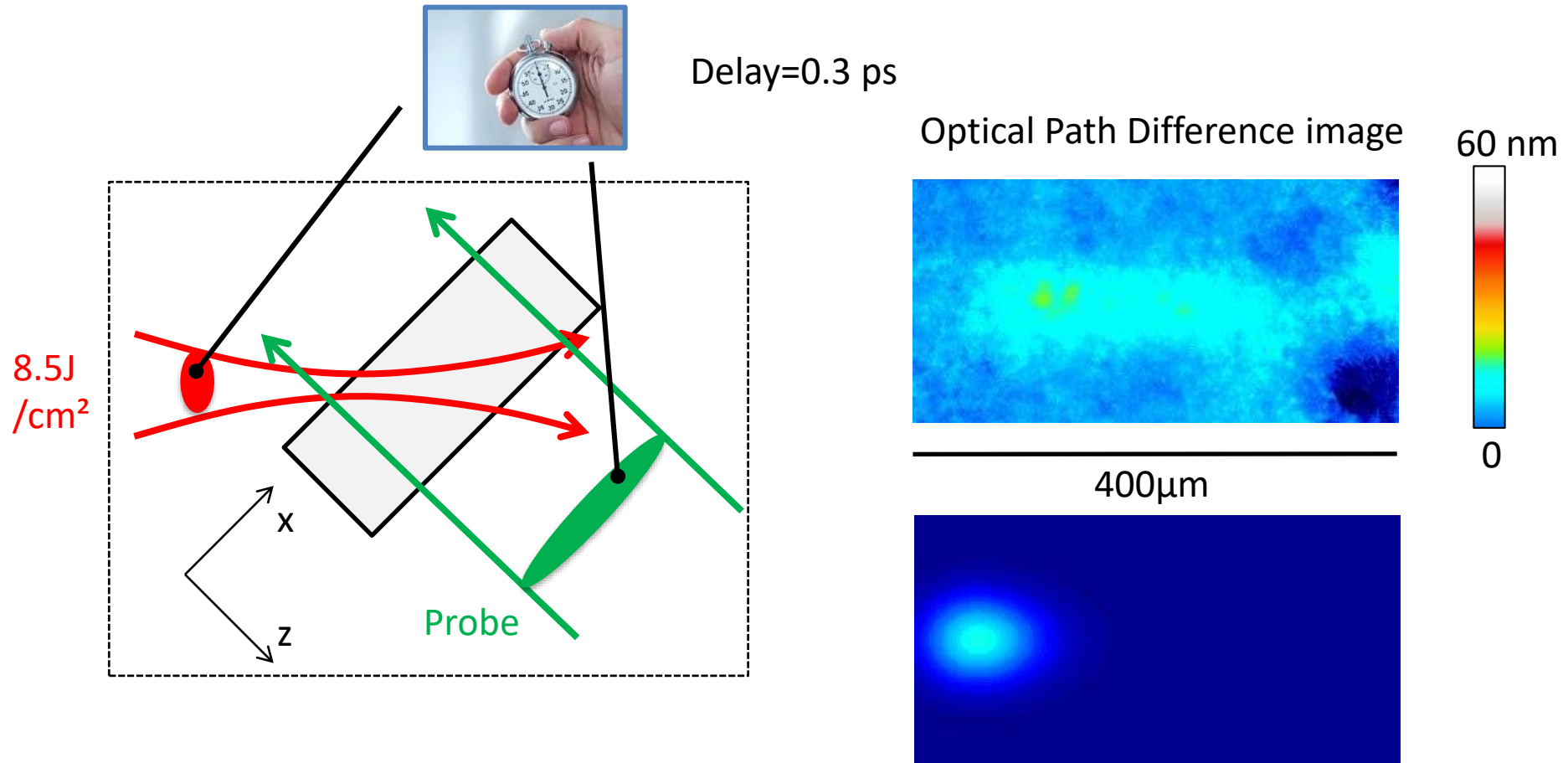
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

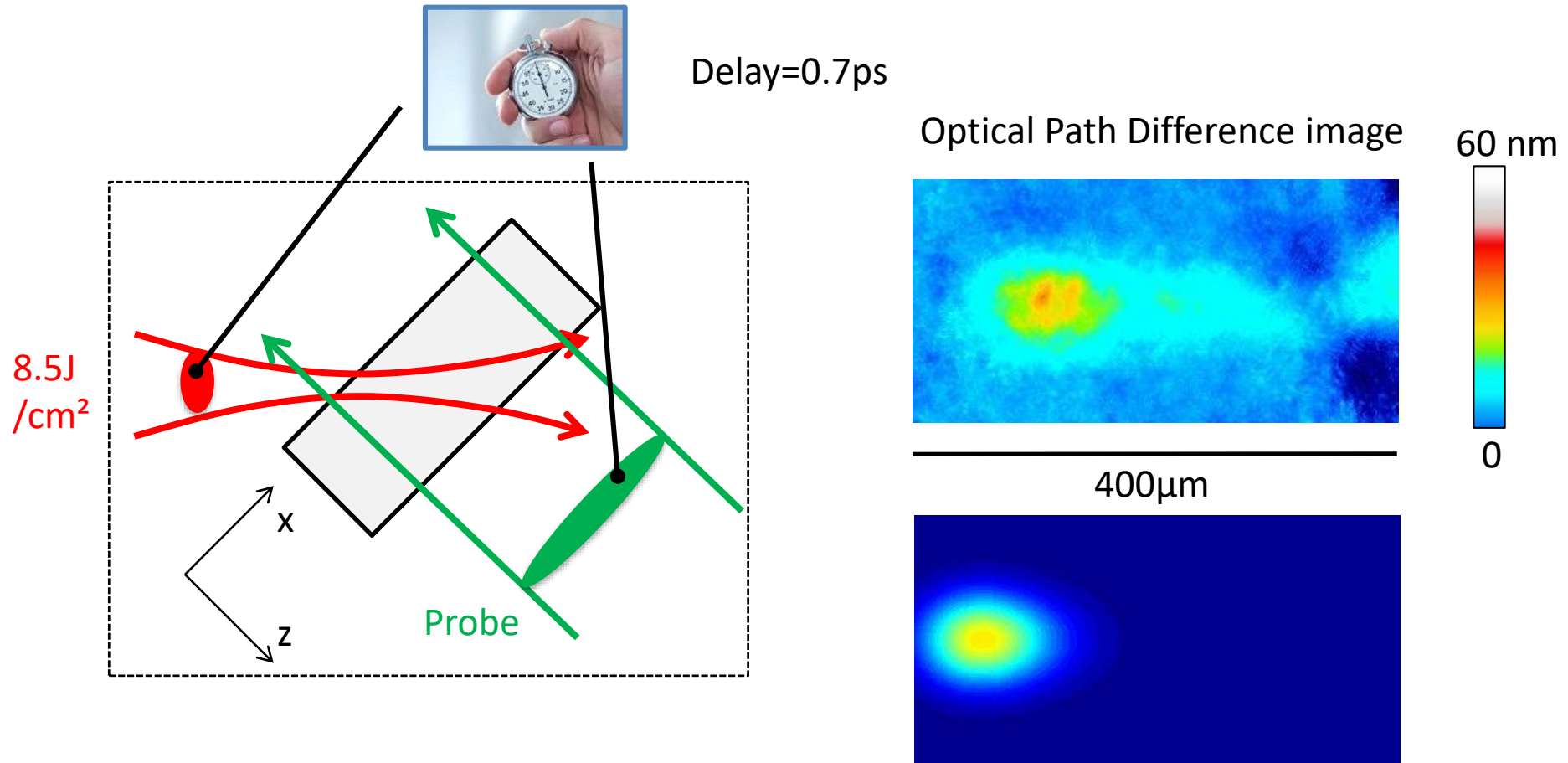
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

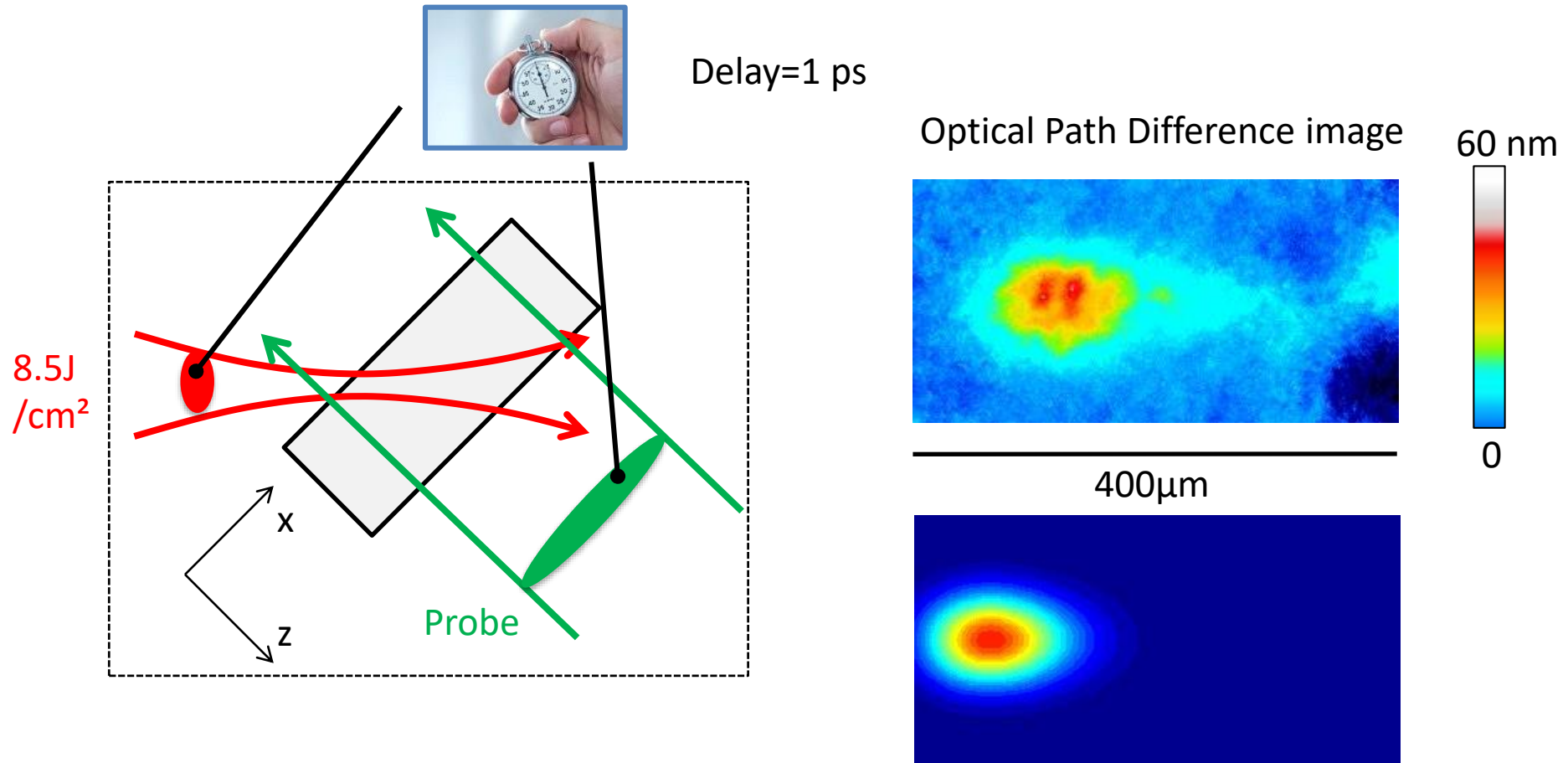
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

Non-linear Kerr effect in fused silica

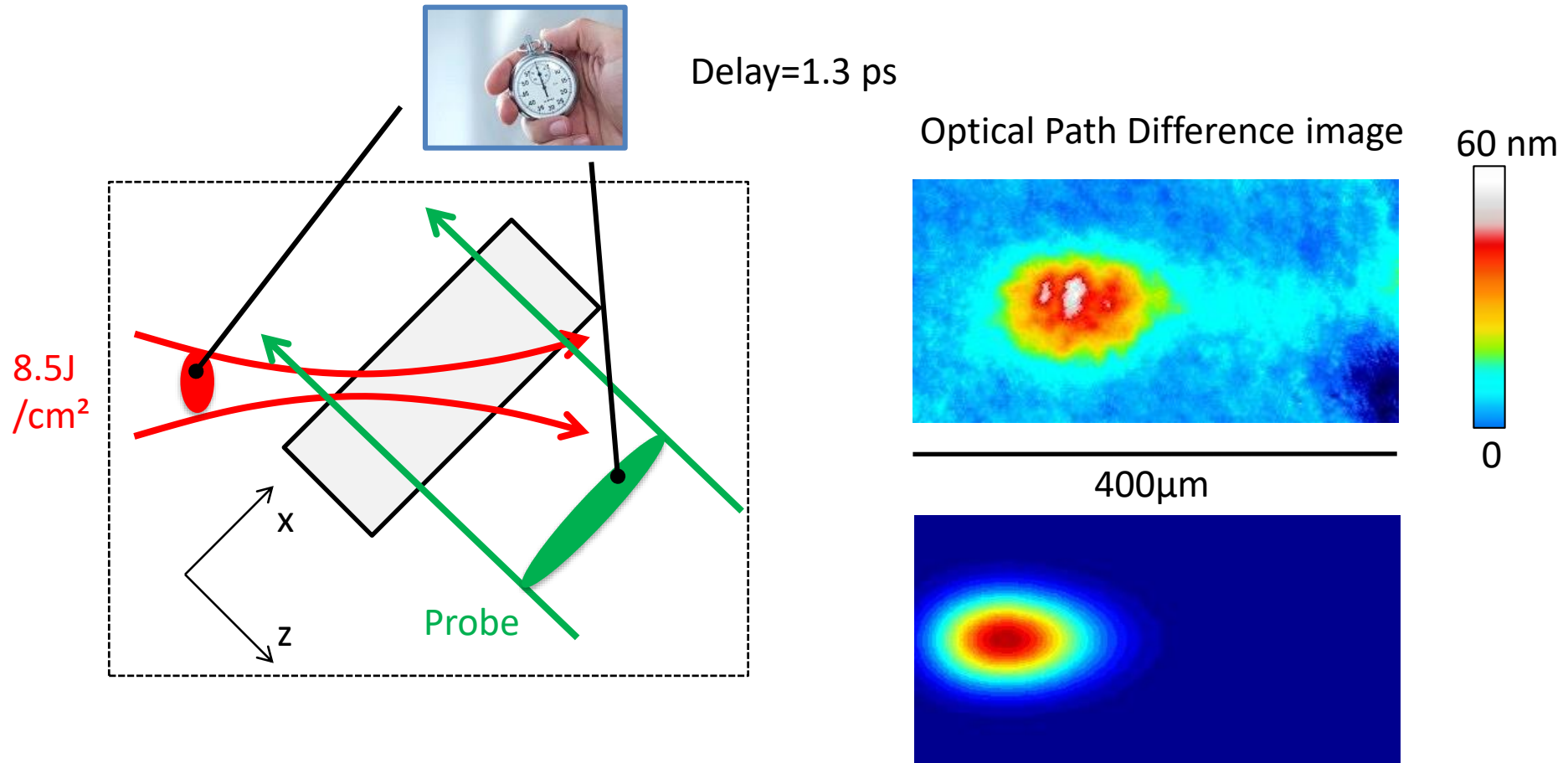


Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica



# Time-resolved phase imaging

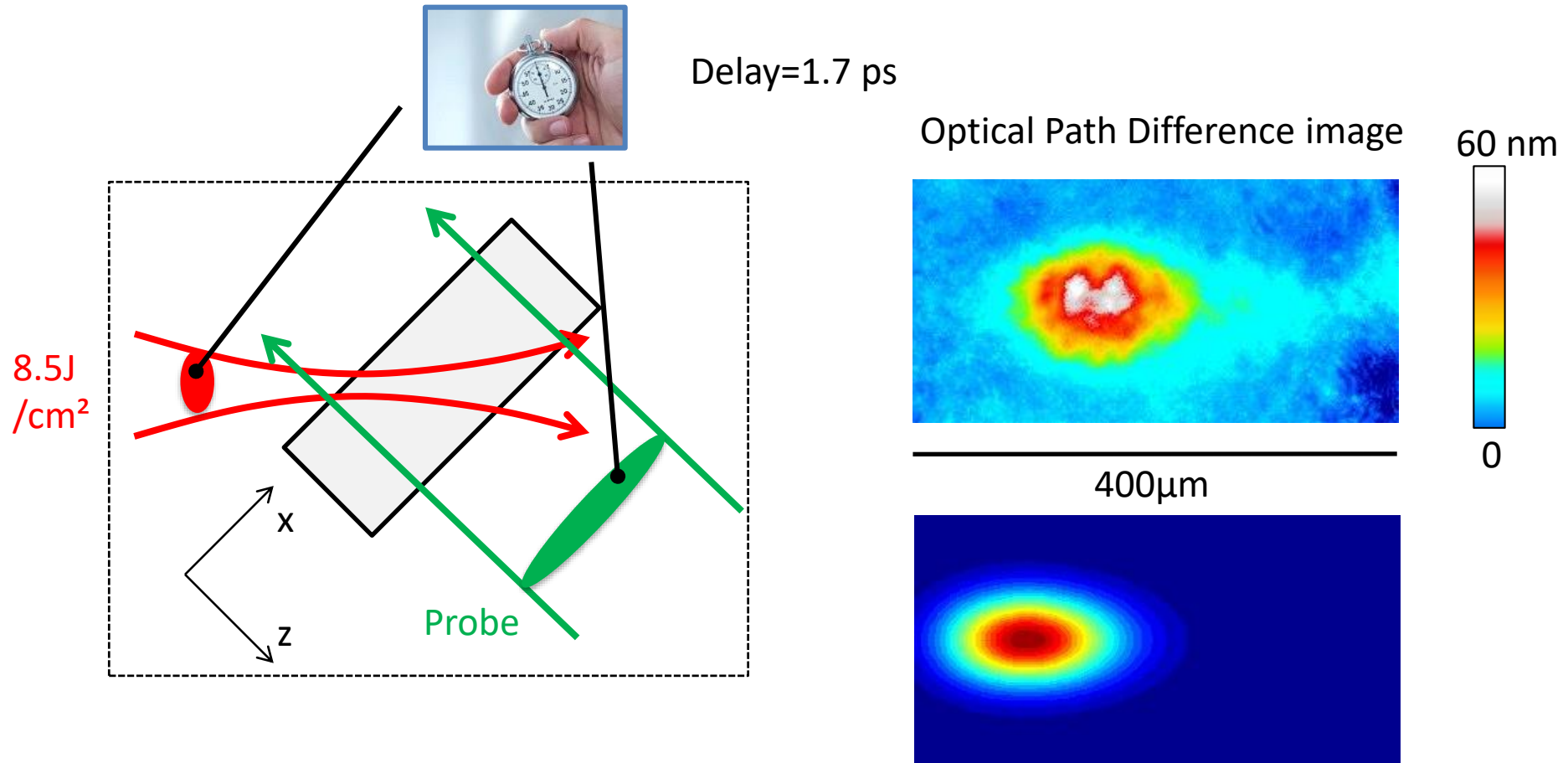
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

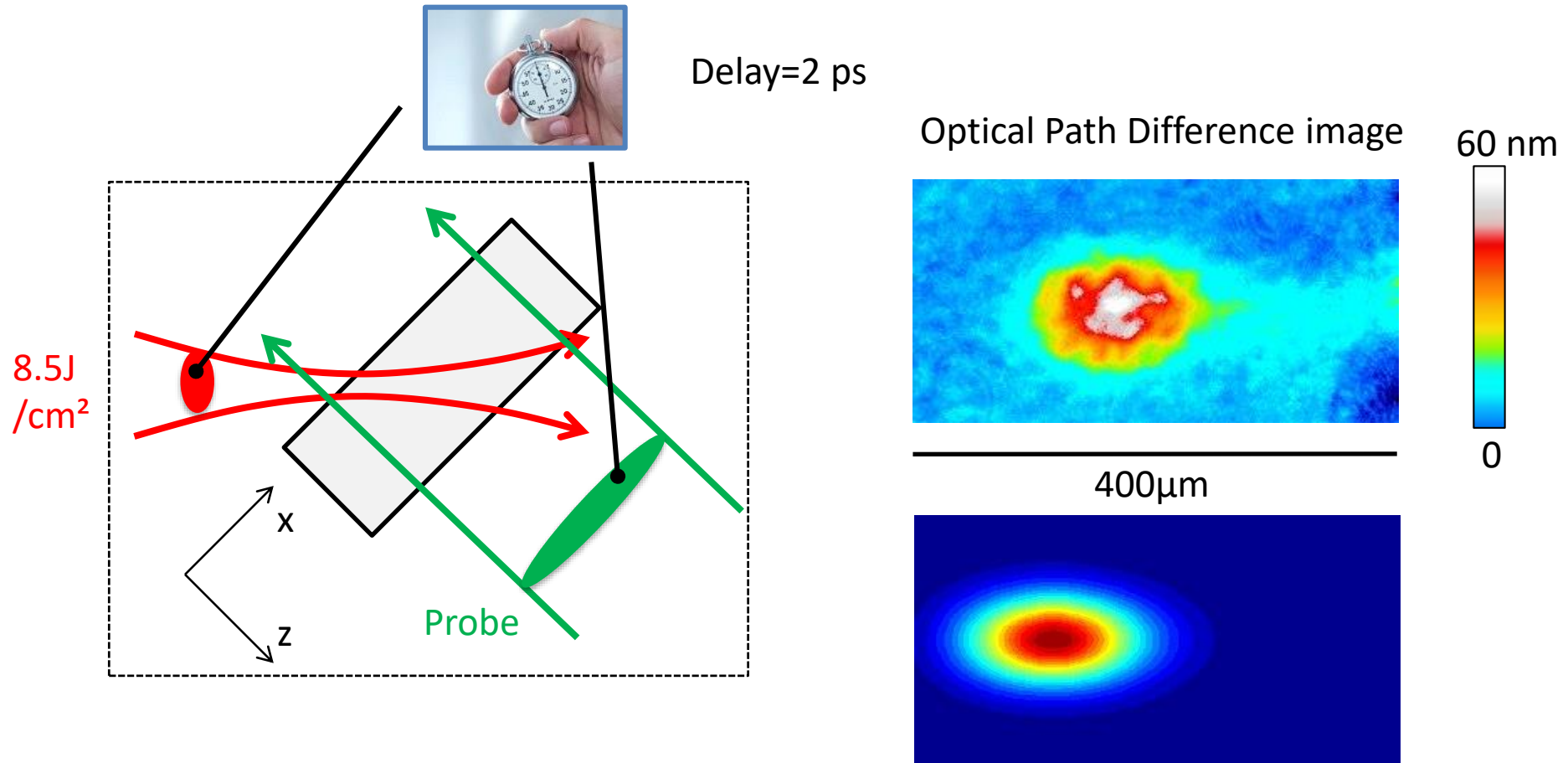
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

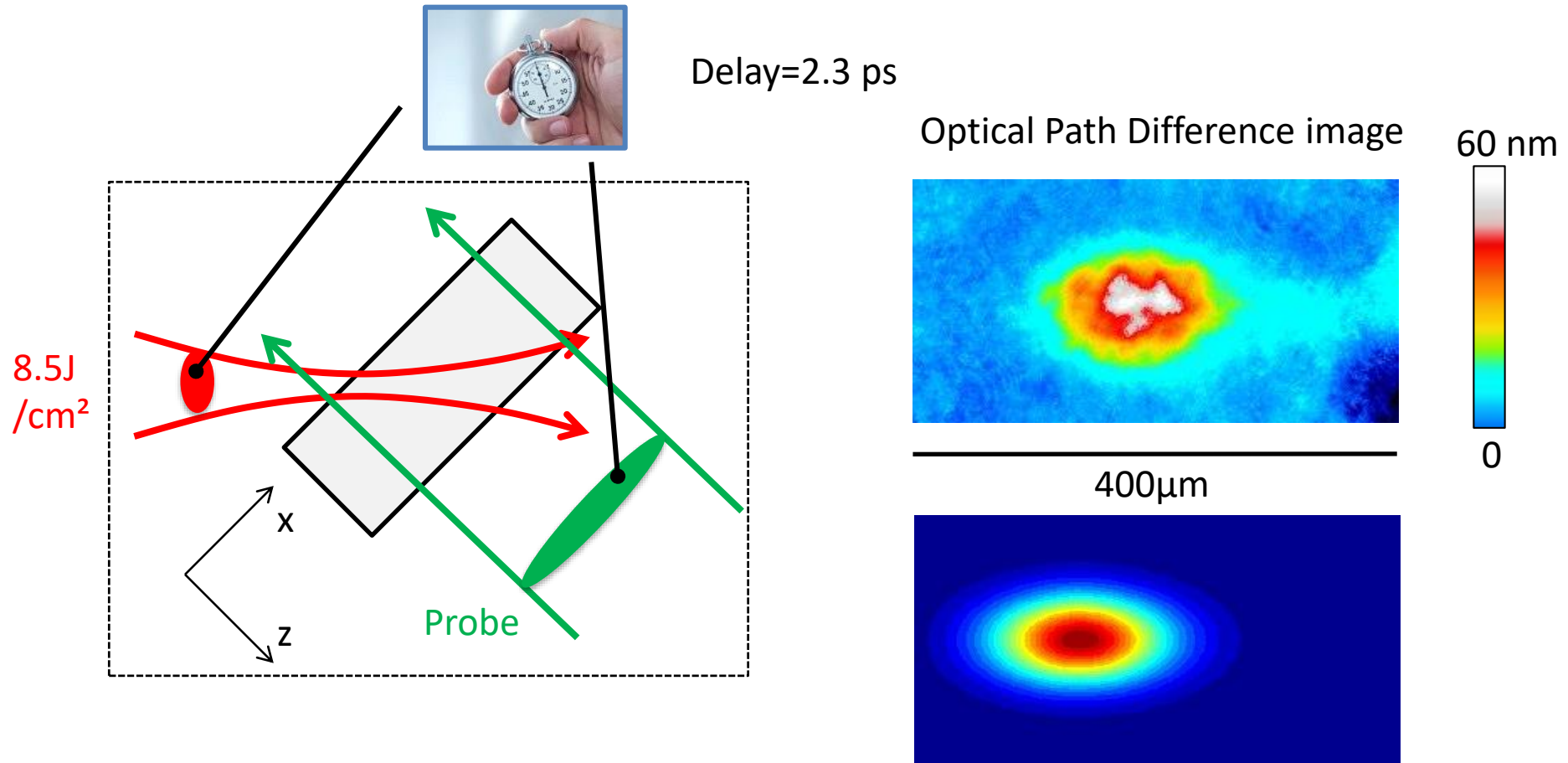
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

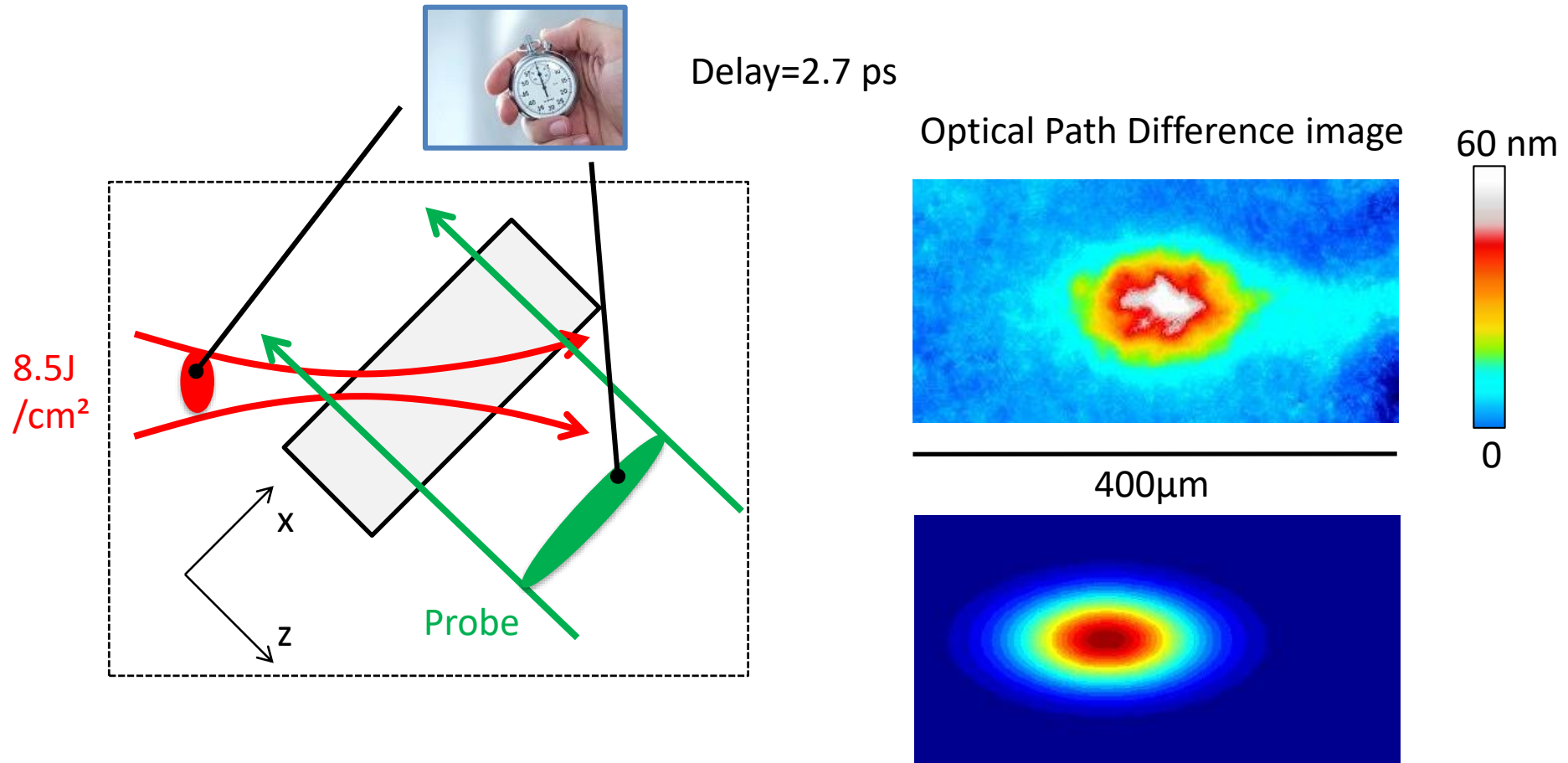
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

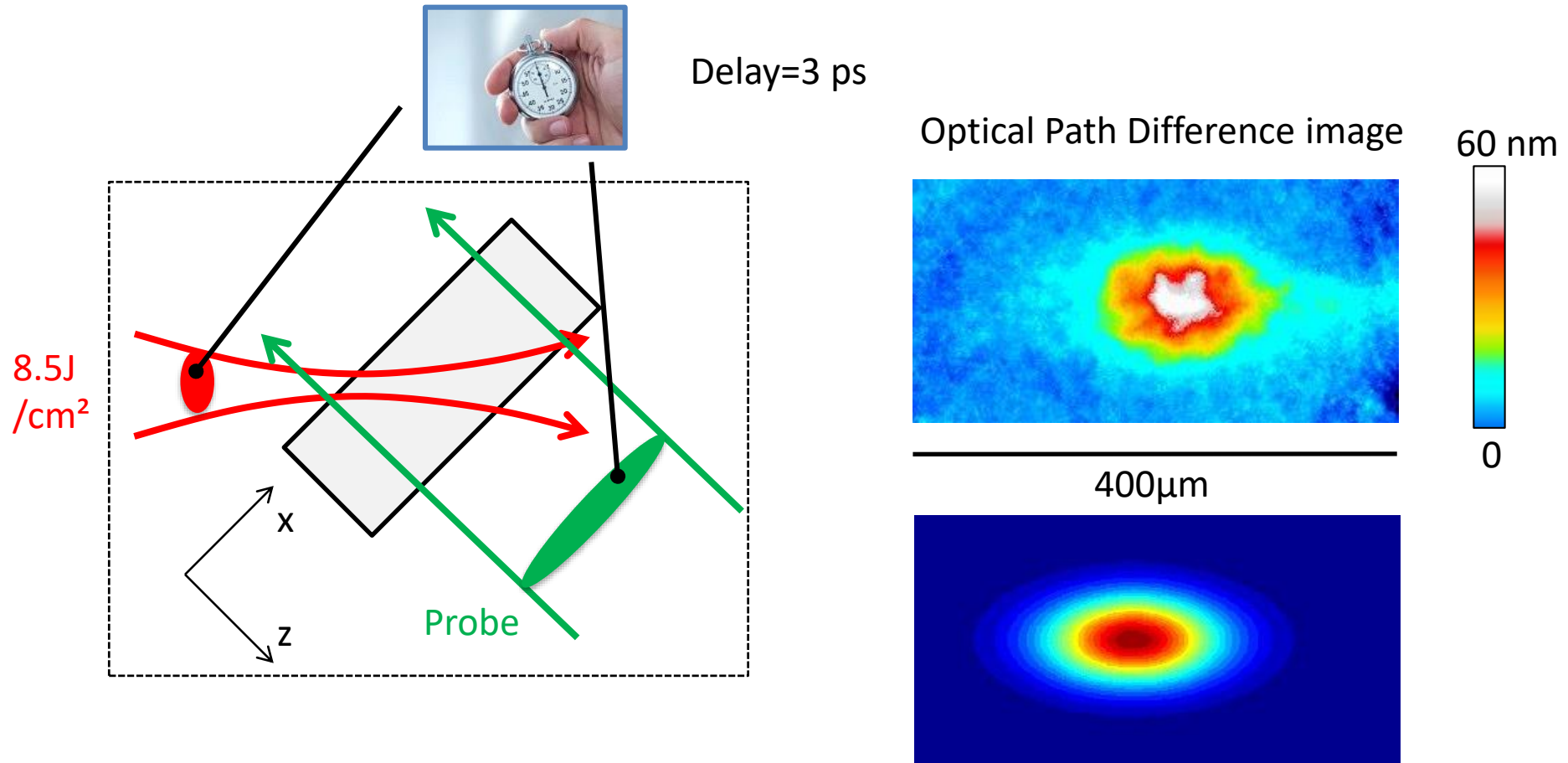
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note: 1ps pulse  $\leftrightarrow$  200 $\mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

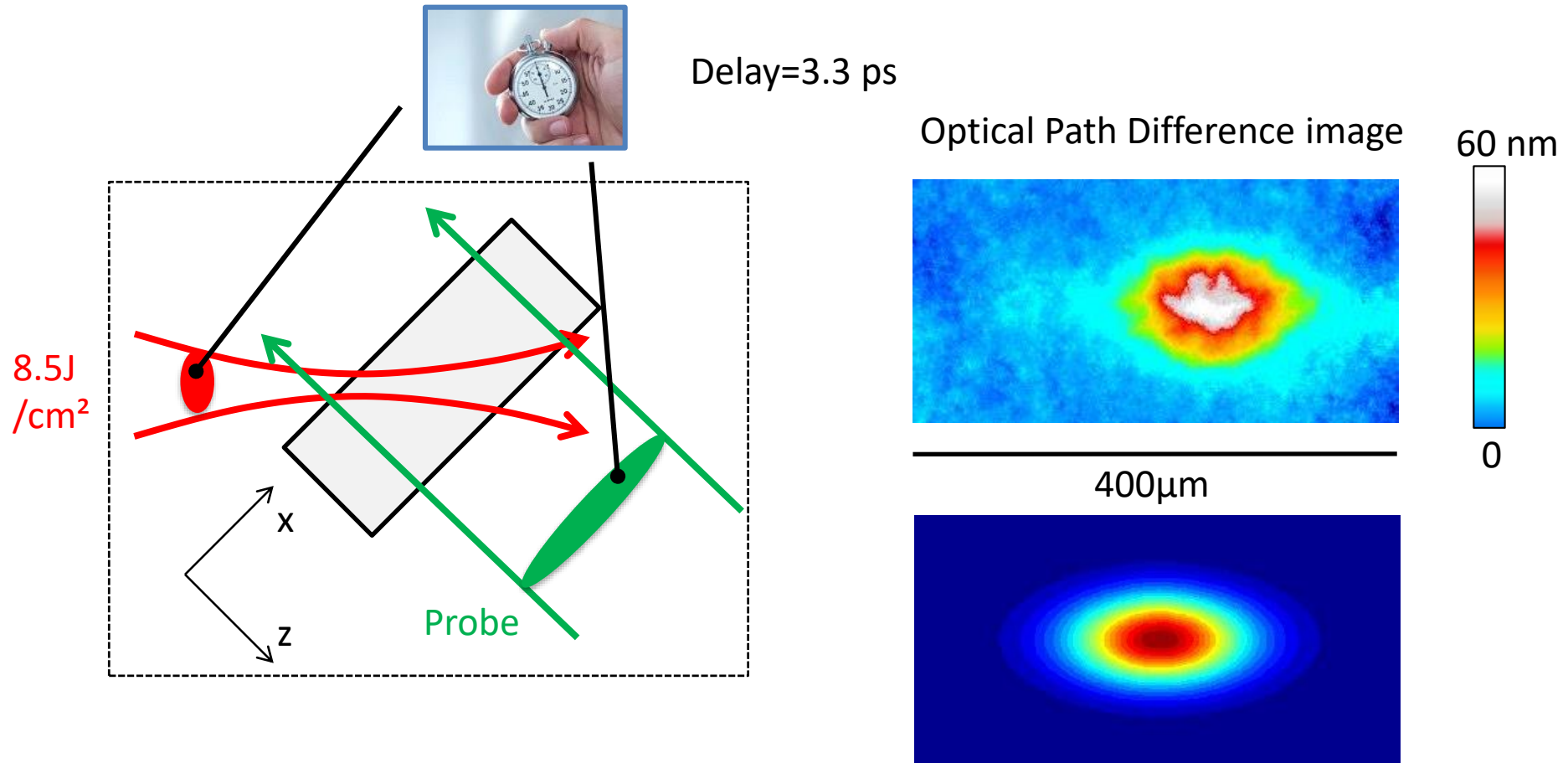
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

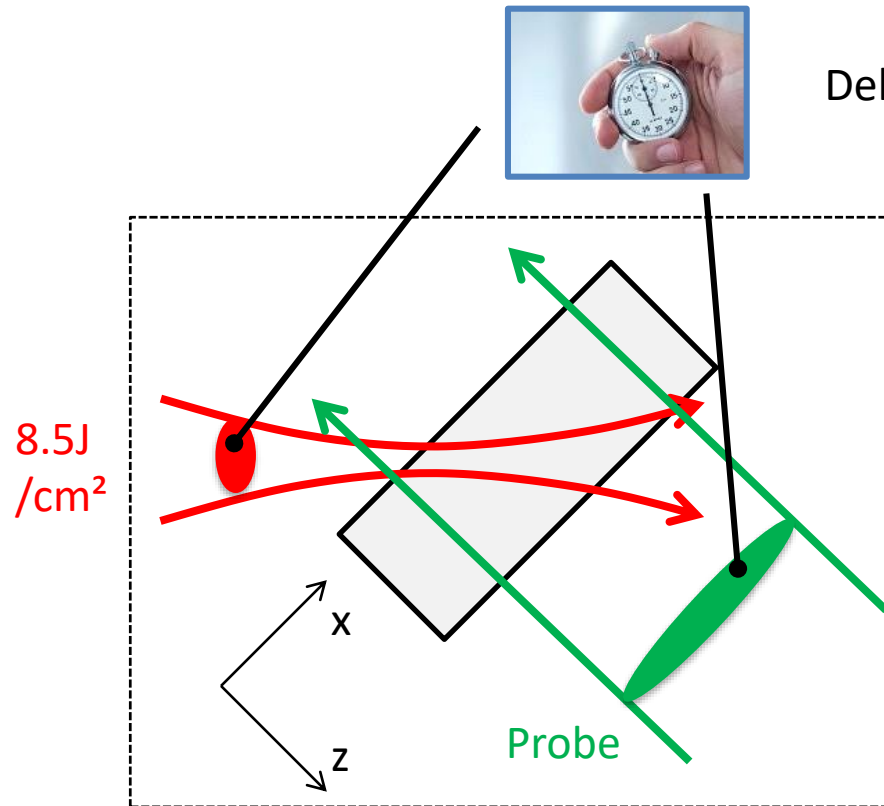
Non-linear Kerr effect in fused silica



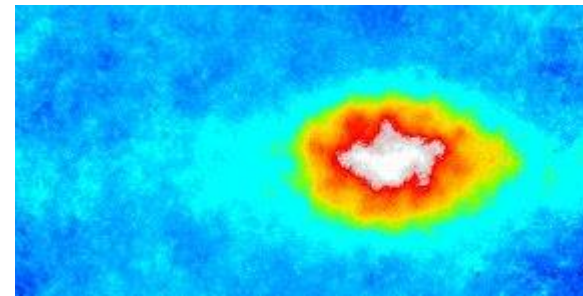
Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

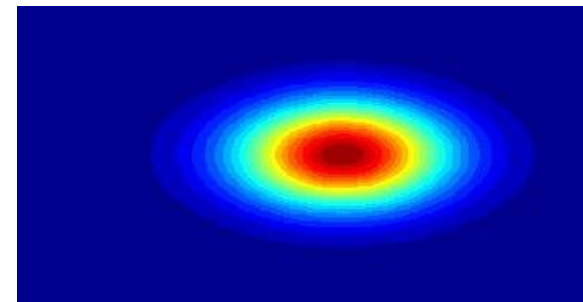
Non-linear Kerr effect in fused silica



Optical Path Difference image



400μm

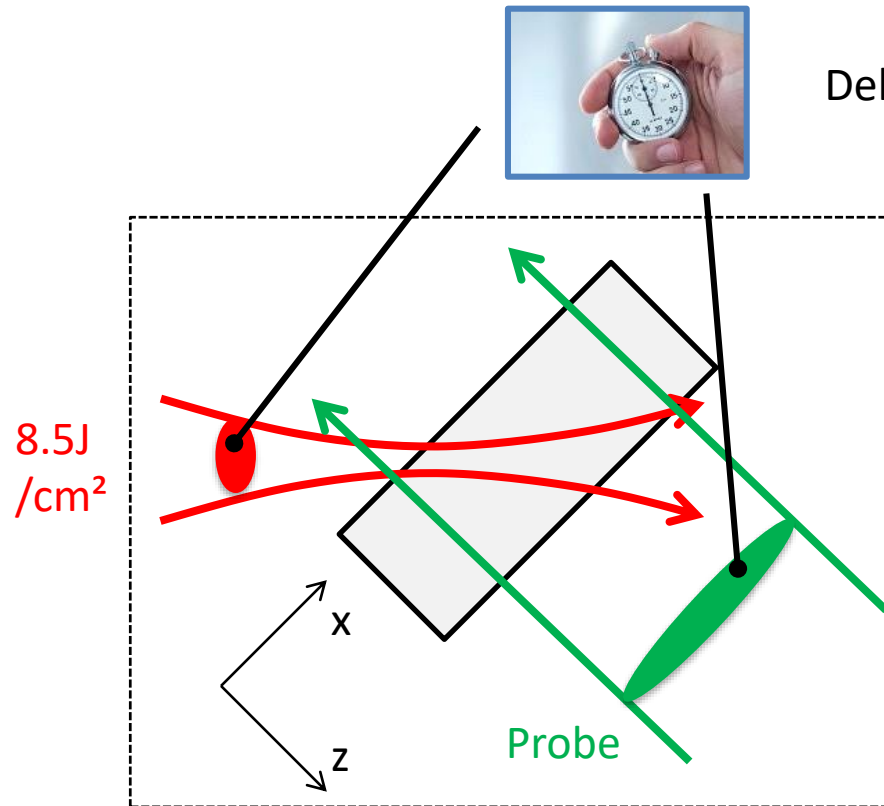


Note: 1ps pulse  $\leftrightarrow$  200μm in silica

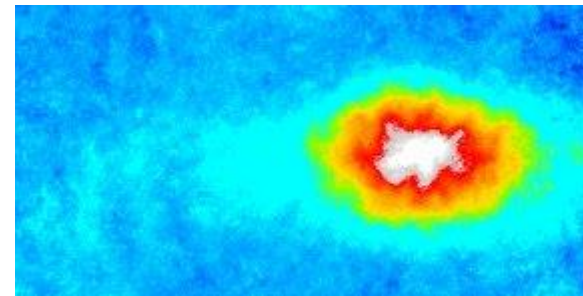


# Time-resolved phase imaging

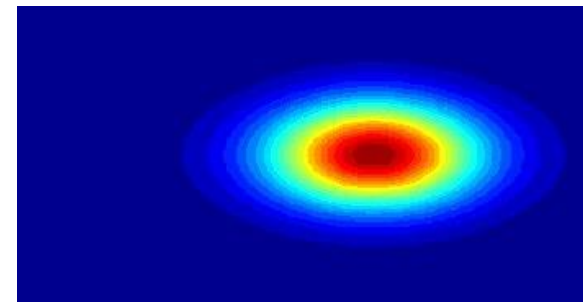
Non-linear Kerr effect in fused silica



Optical Path Difference image



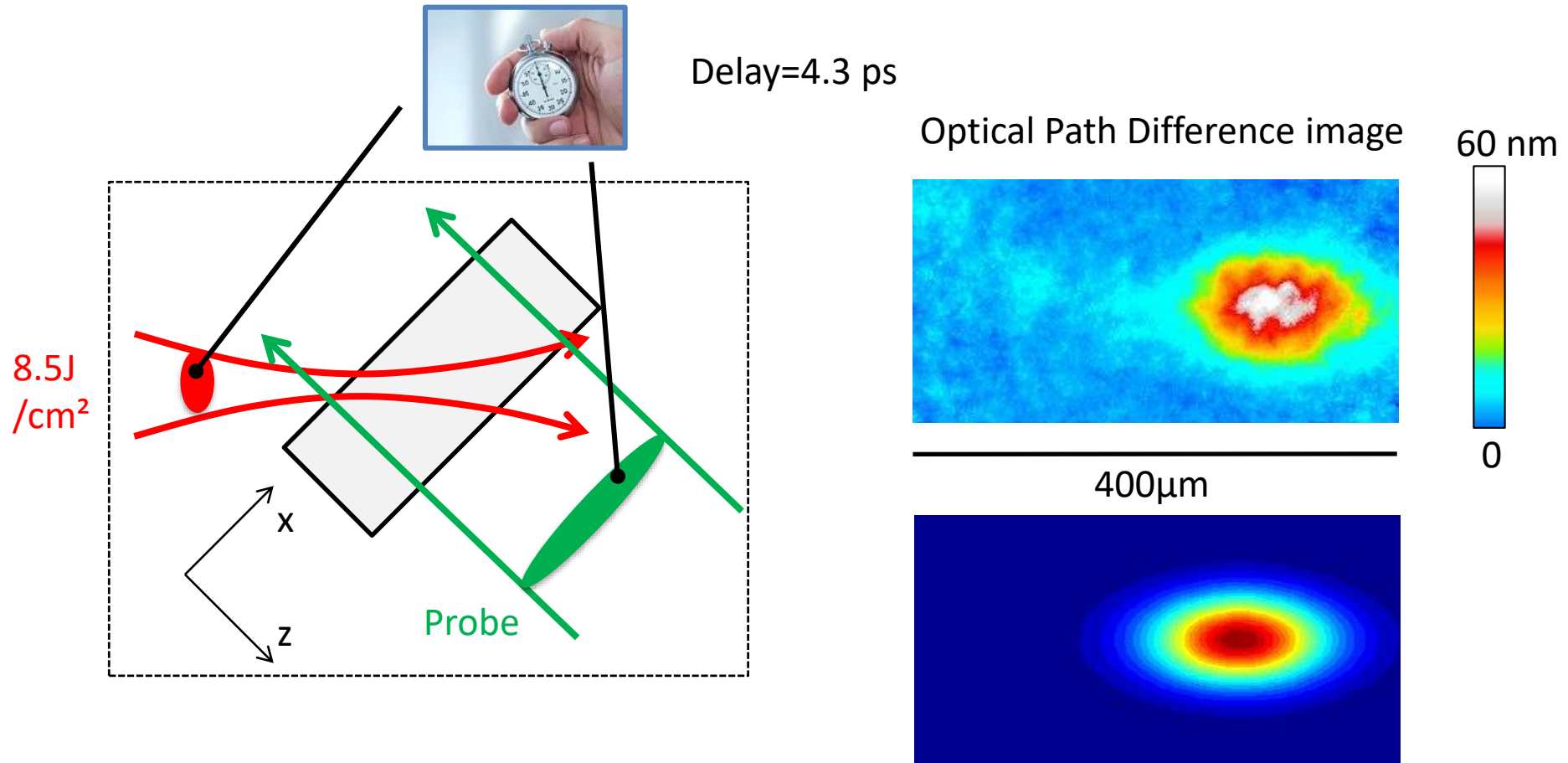
400μm



Note: 1ps pulse  $\leftrightarrow$  200μm in silica

# Time-resolved phase imaging

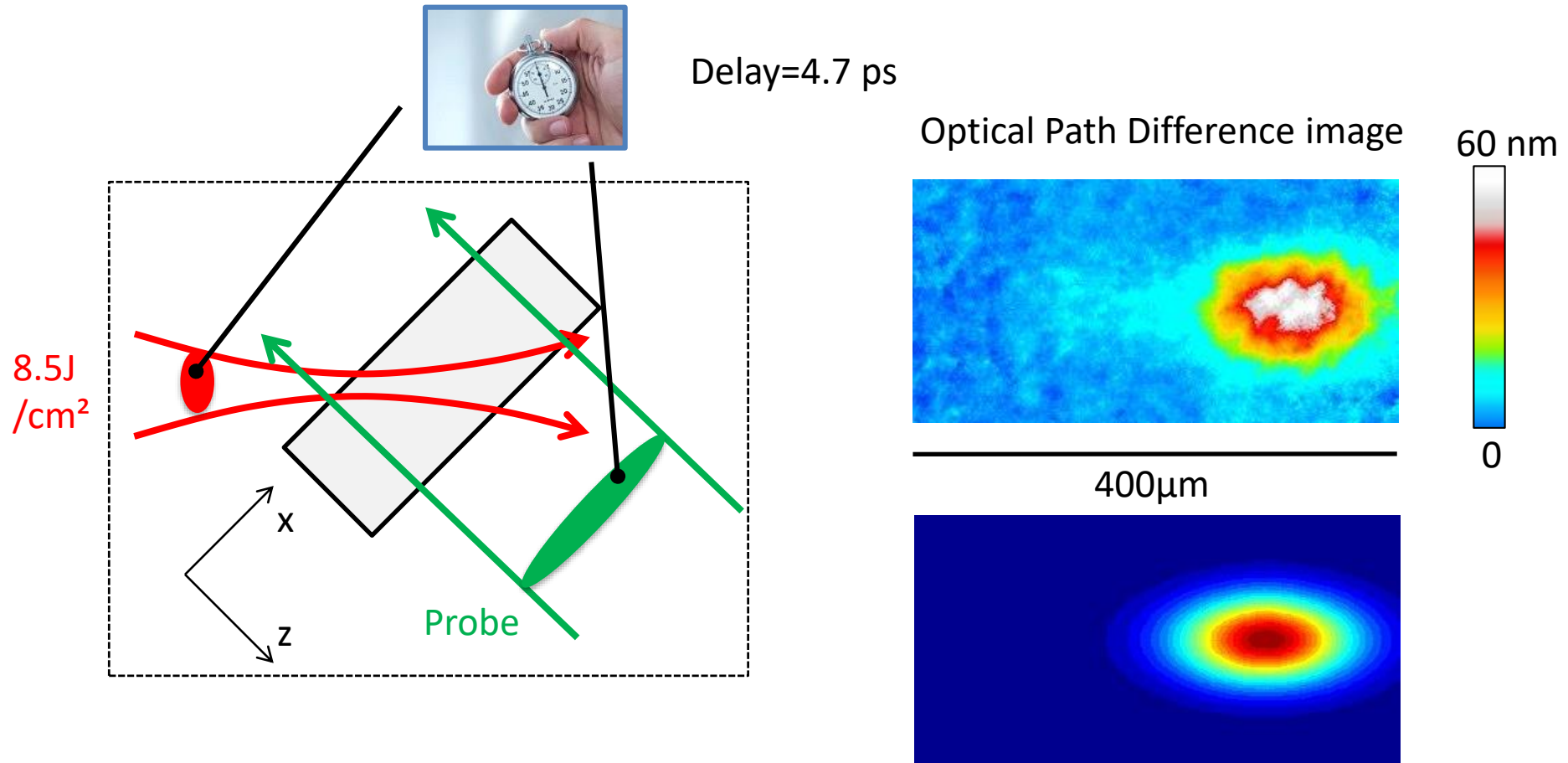
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

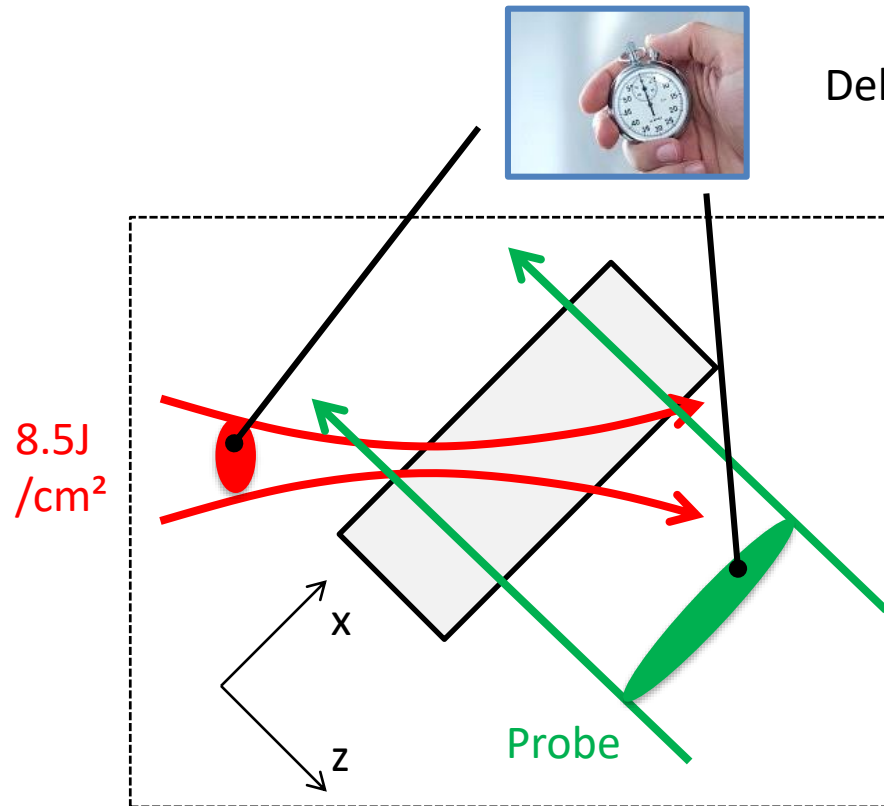
Non-linear Kerr effect in fused silica



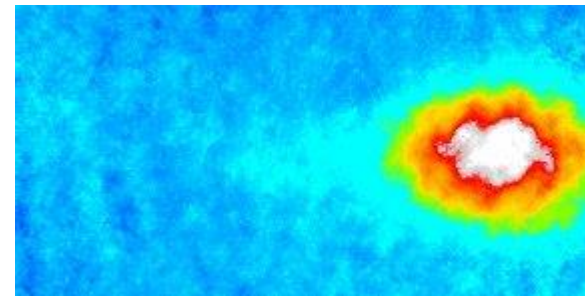
Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

Non-linear Kerr effect in fused silica



Optical Path Difference image

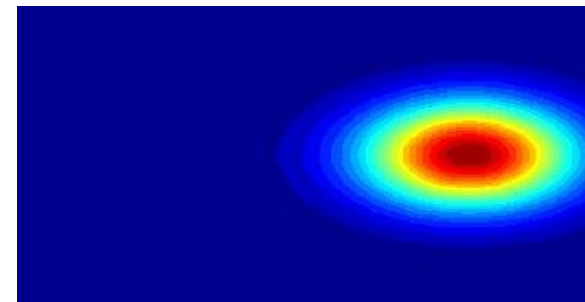


60 nm



0

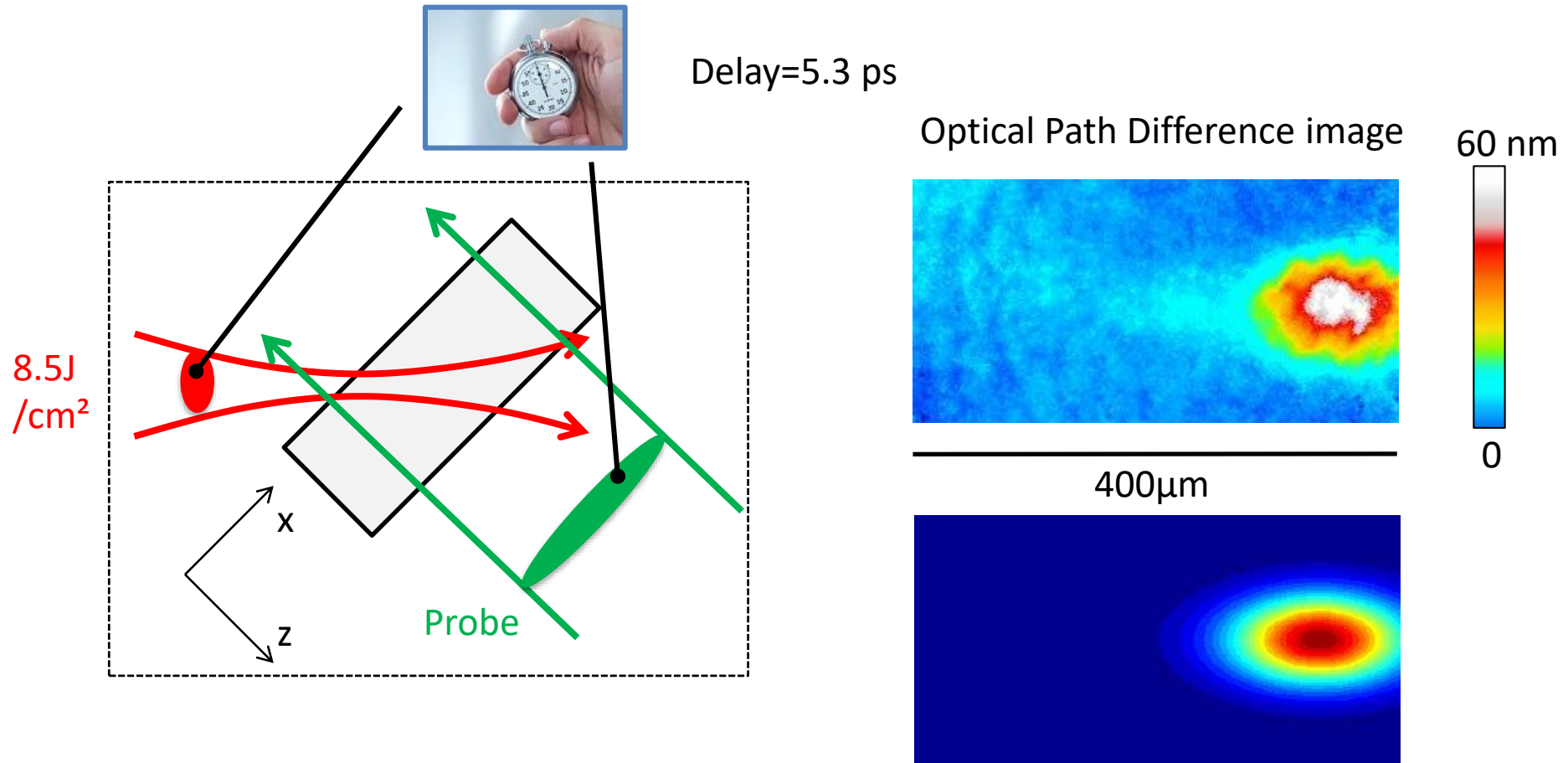
400μm



Note: 1ps pulse  $\leftrightarrow$  200μm in silica

# Time-resolved phase imaging

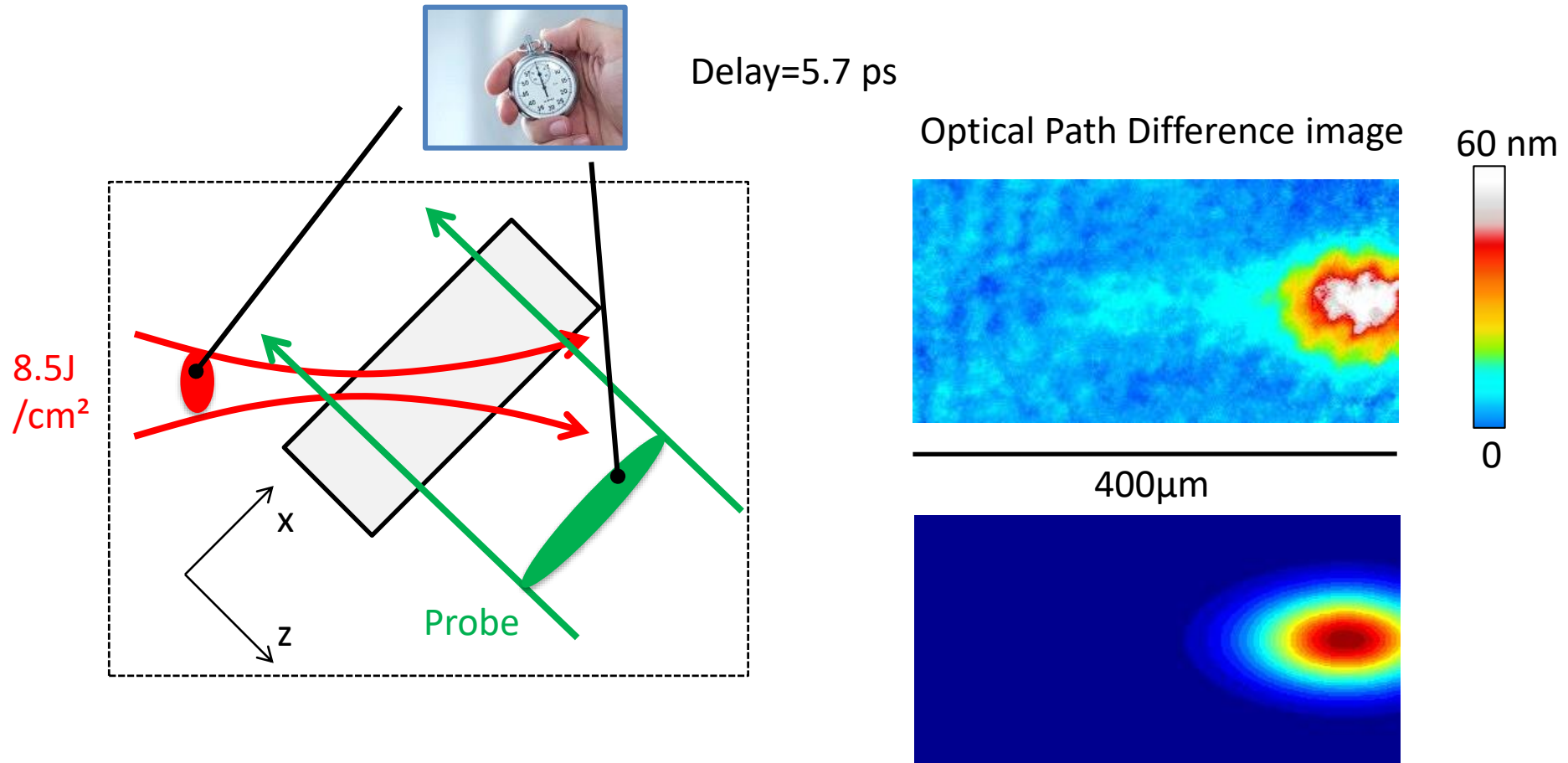
Non-linear Kerr effect in fused silica



Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

Non-linear Kerr effect in fused silica

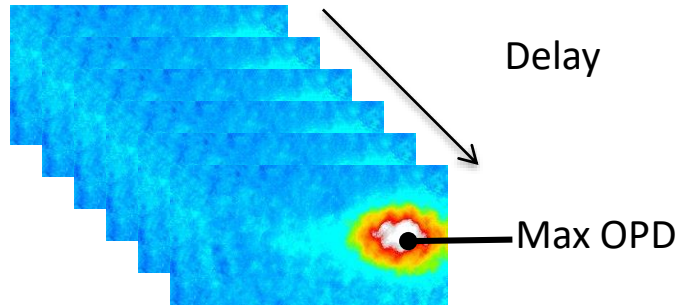


Note:  $1 \text{ ps}$  pulse  $\leftrightarrow$   $200 \mu\text{m}$  in silica

# Time-resolved phase imaging

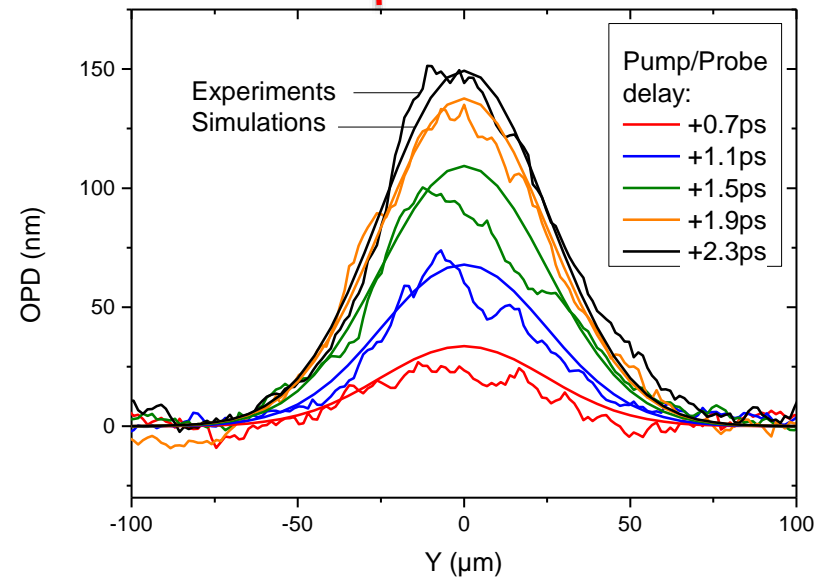
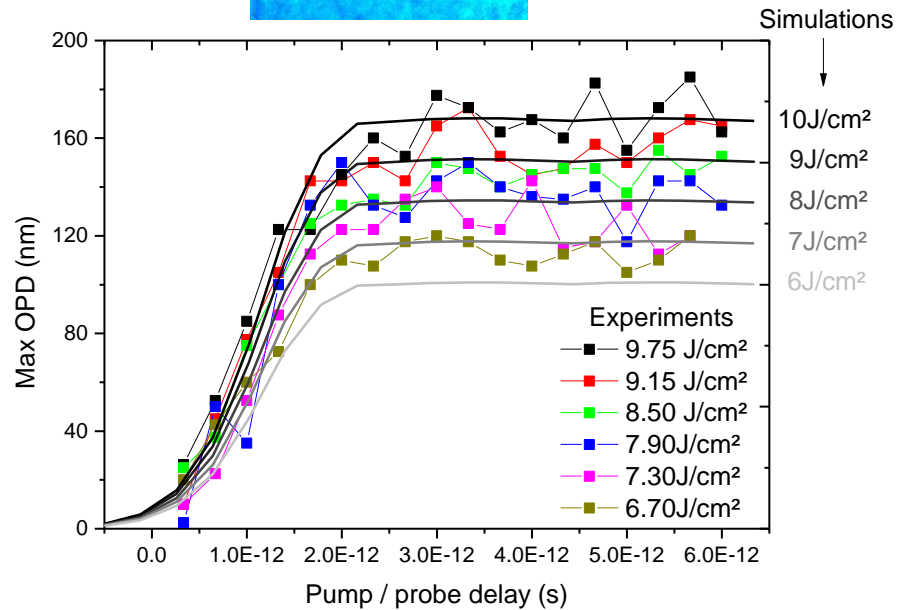
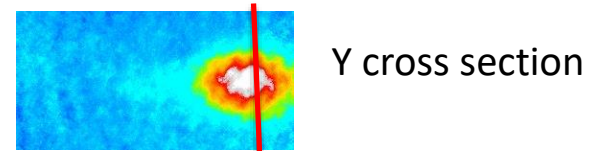
## Experiments vs simulation

Comparison of quantitative values ( $n_2=3 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}^*$ ):



\*D. Milan, *Appl. Opt.* 37, 546 (1998).

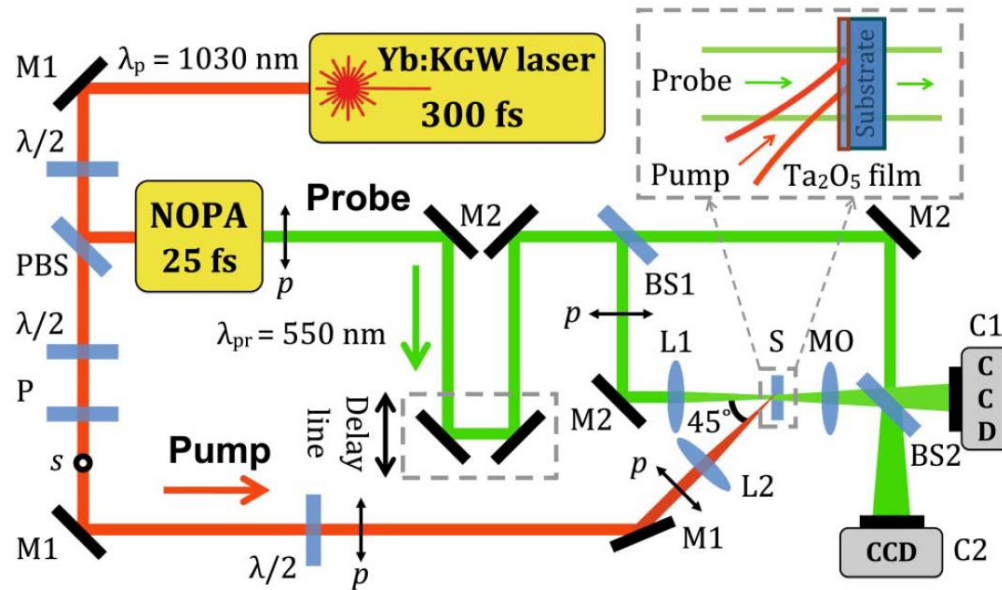
\*S. Santran et al., *J. Opt. Soc. Am. B* 21, 2180 (2004).



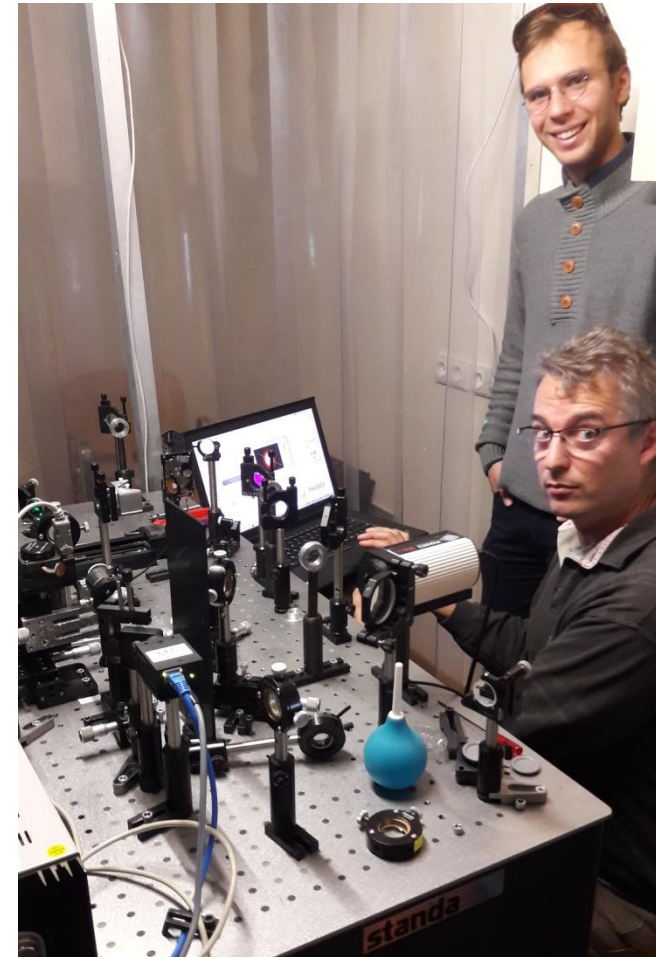
Gallais and Monneret., *Opt. Lett.* 41, 32455 (2016)

# Mesures d'effets transitoires

Comparaison avec la DHM

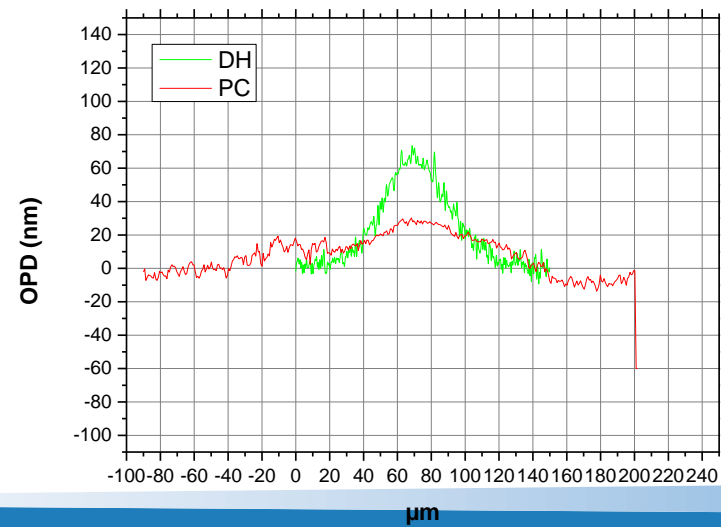
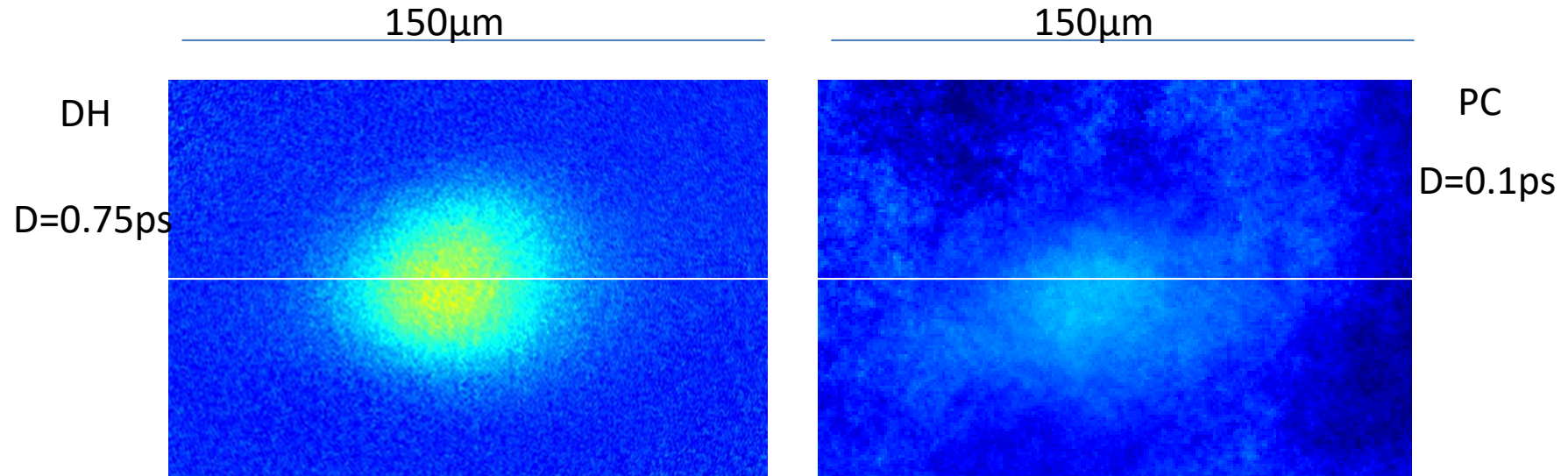


Expériences comparatives réalisées au Laser Research Center, Vilnius University

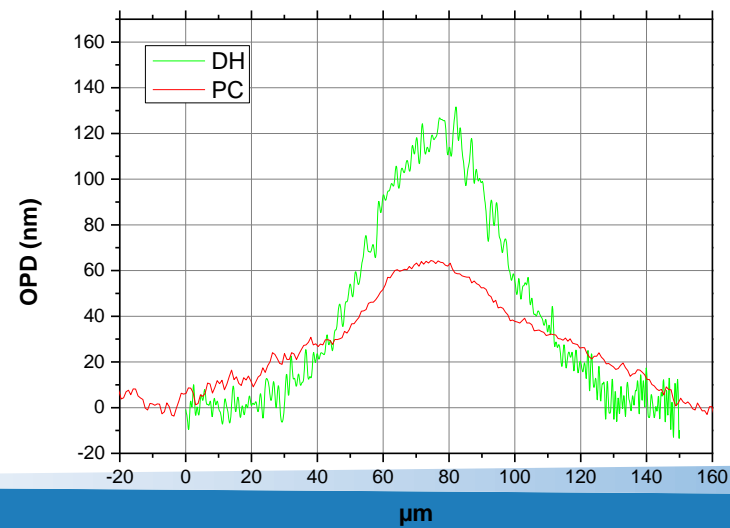
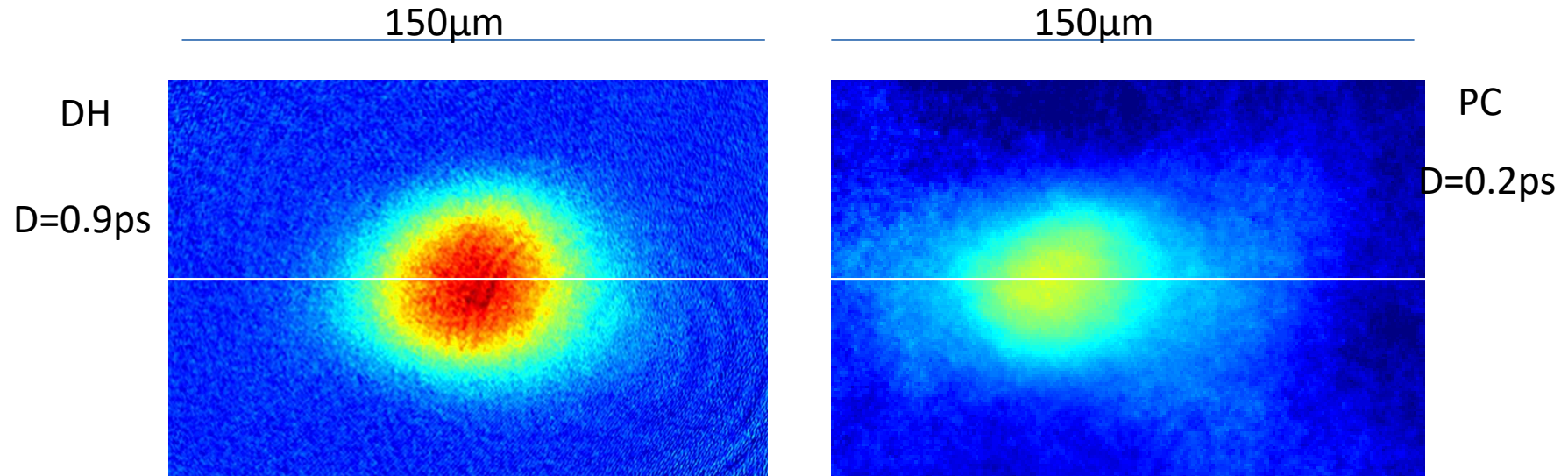




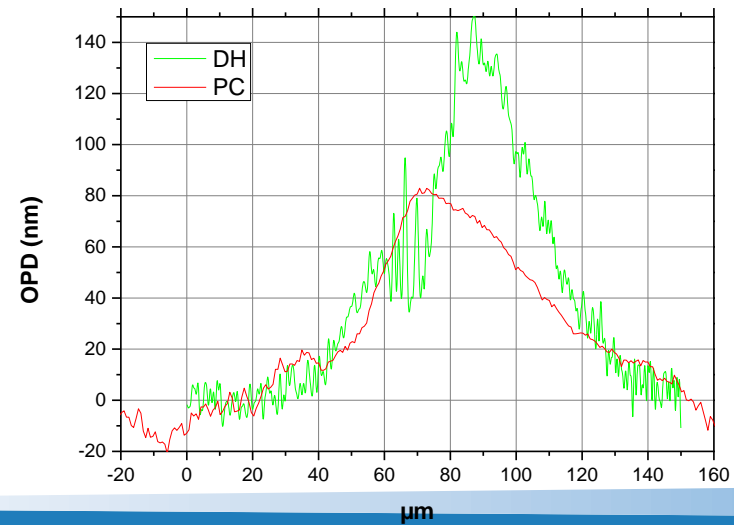
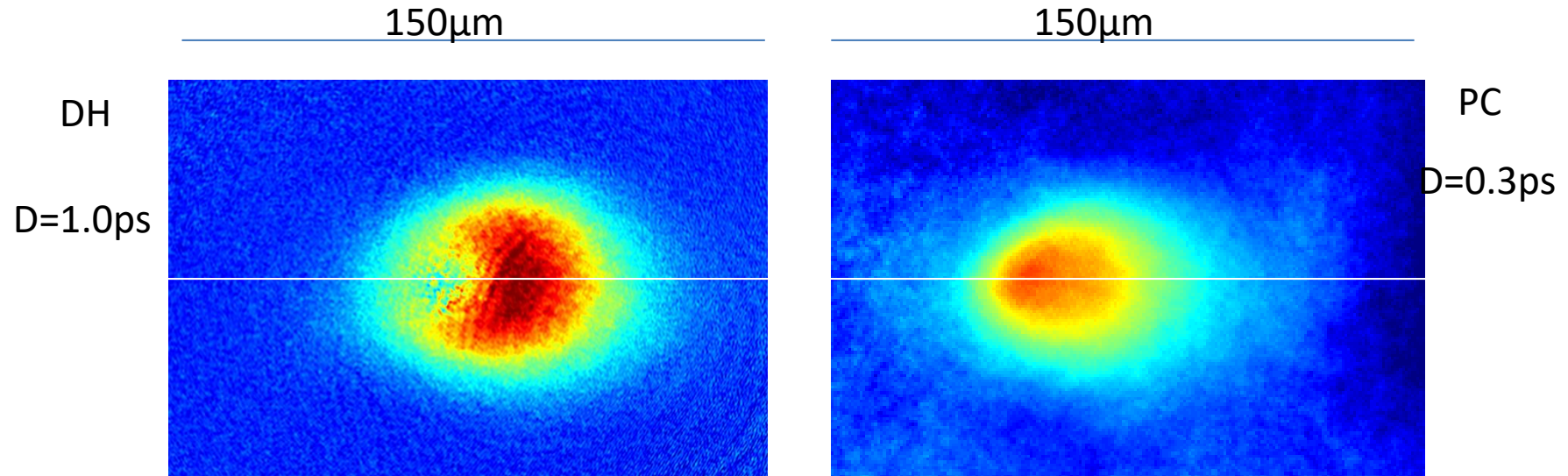
# Comparative measurements



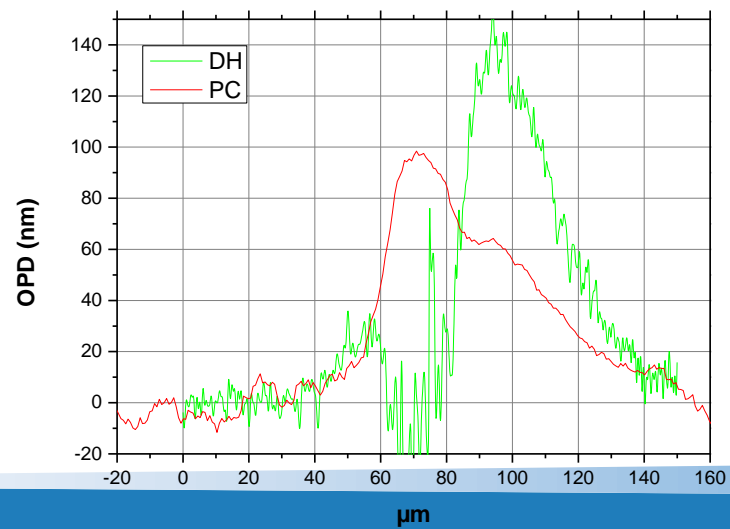
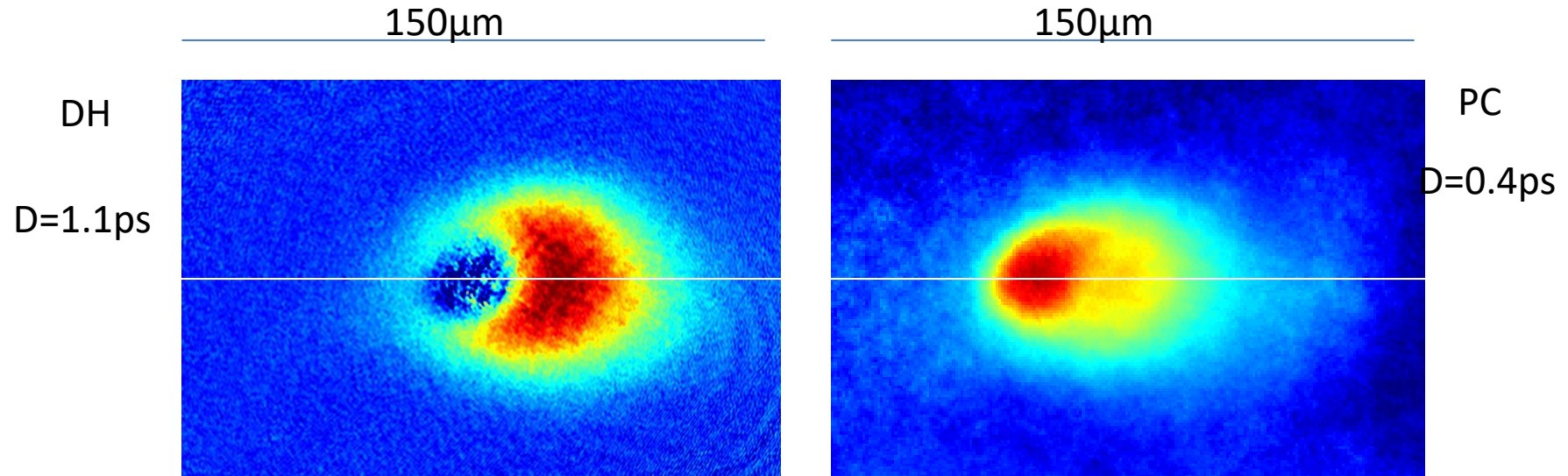
# Comparative measurements



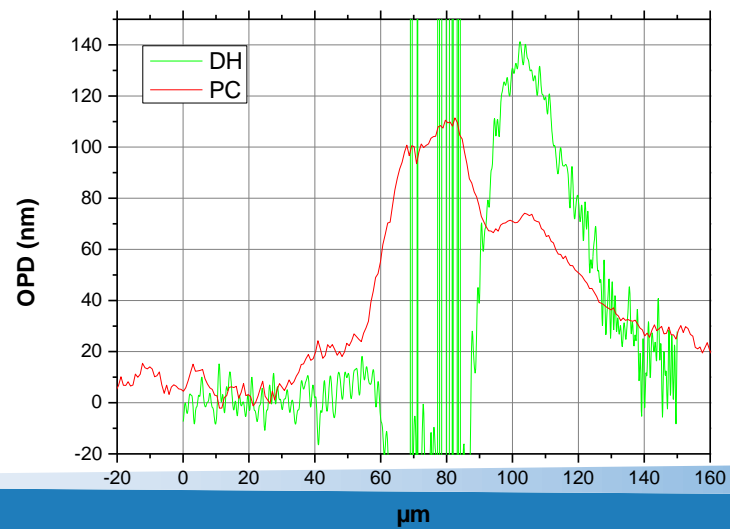
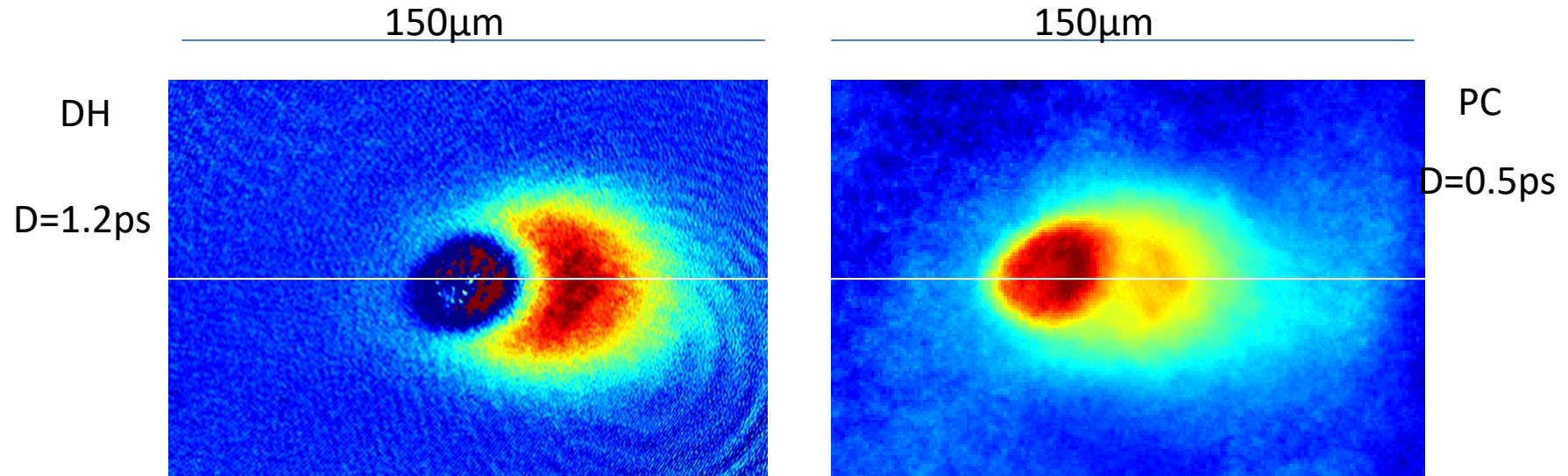
# Comparative measurements



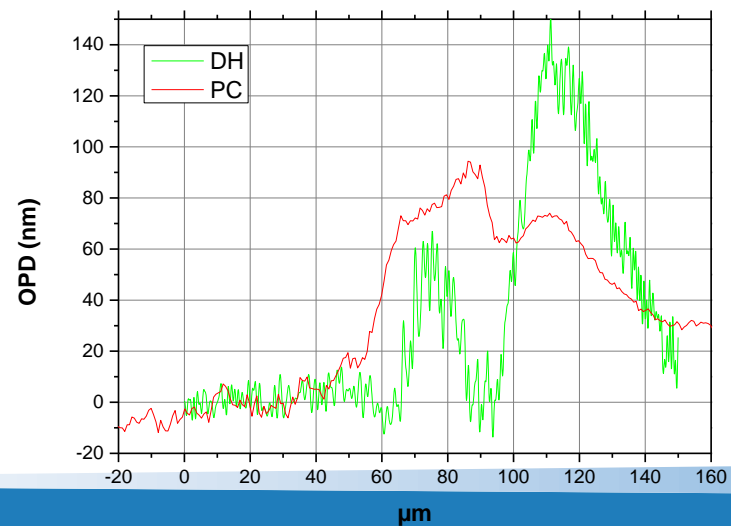
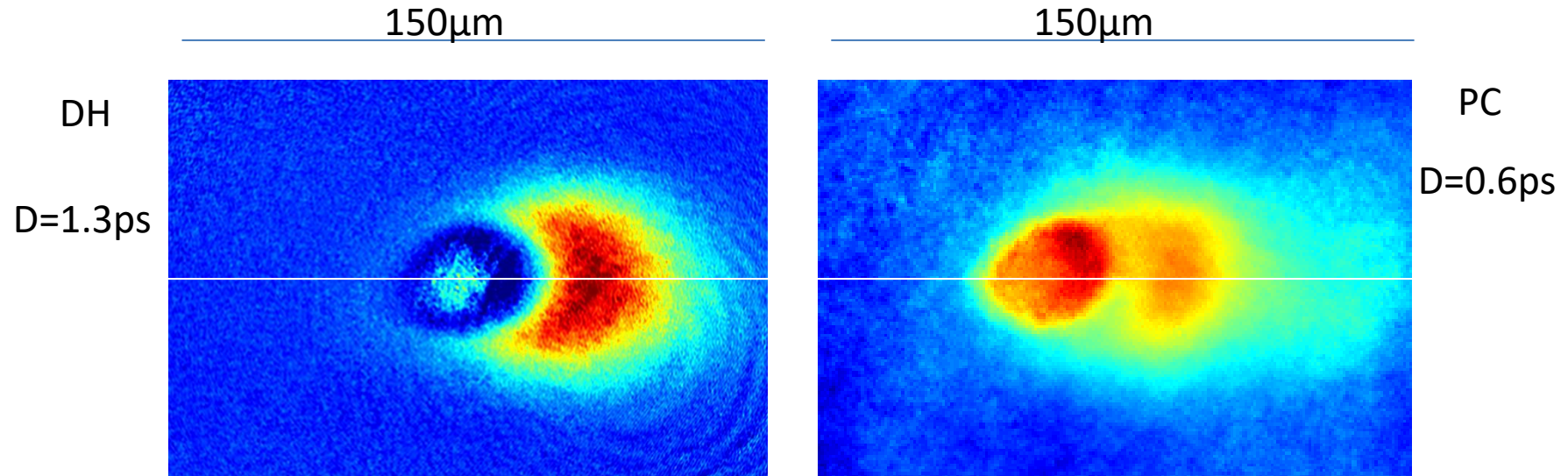
# Comparative measurements



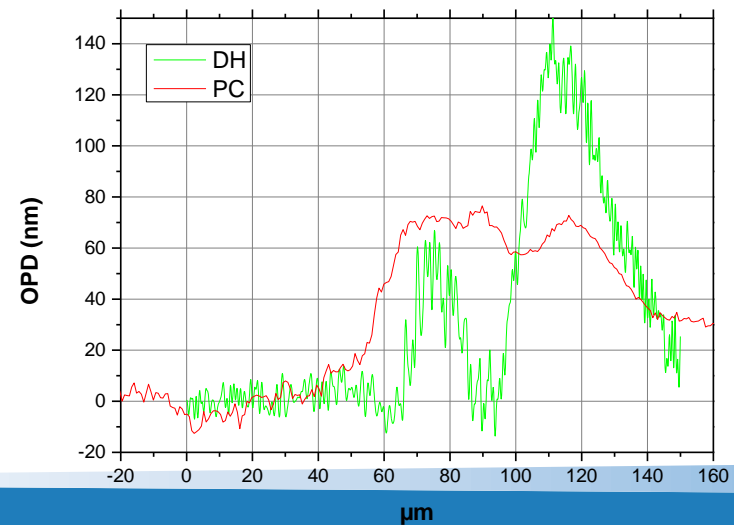
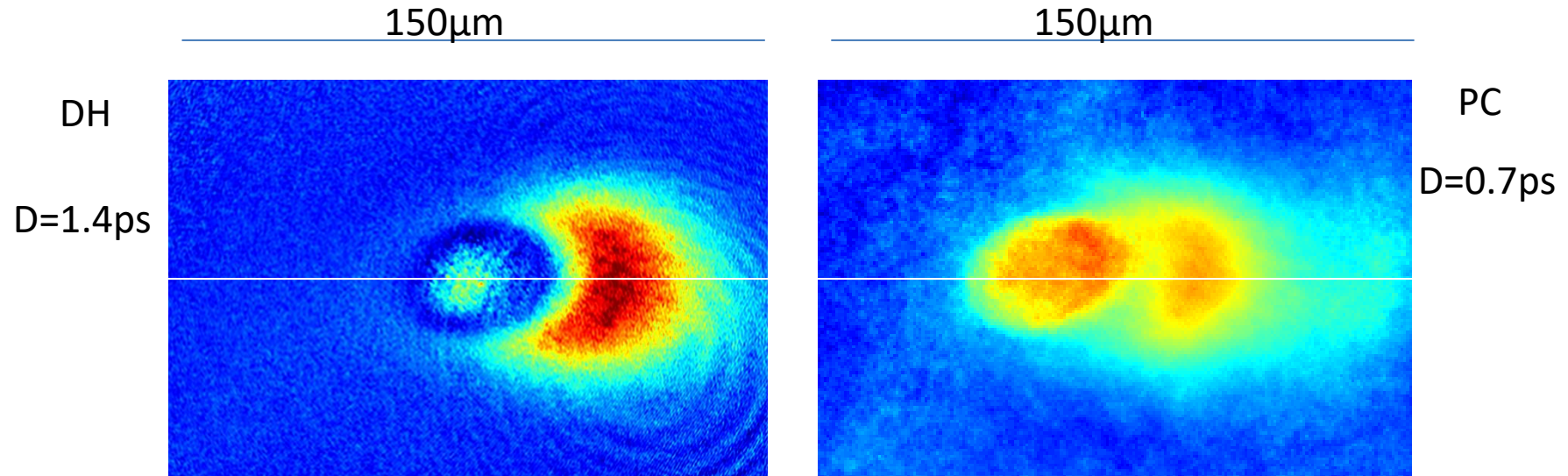
# Comparative measurements



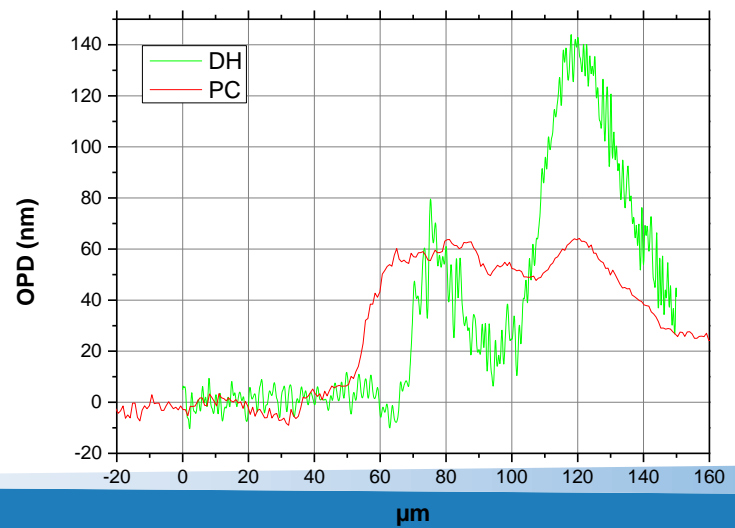
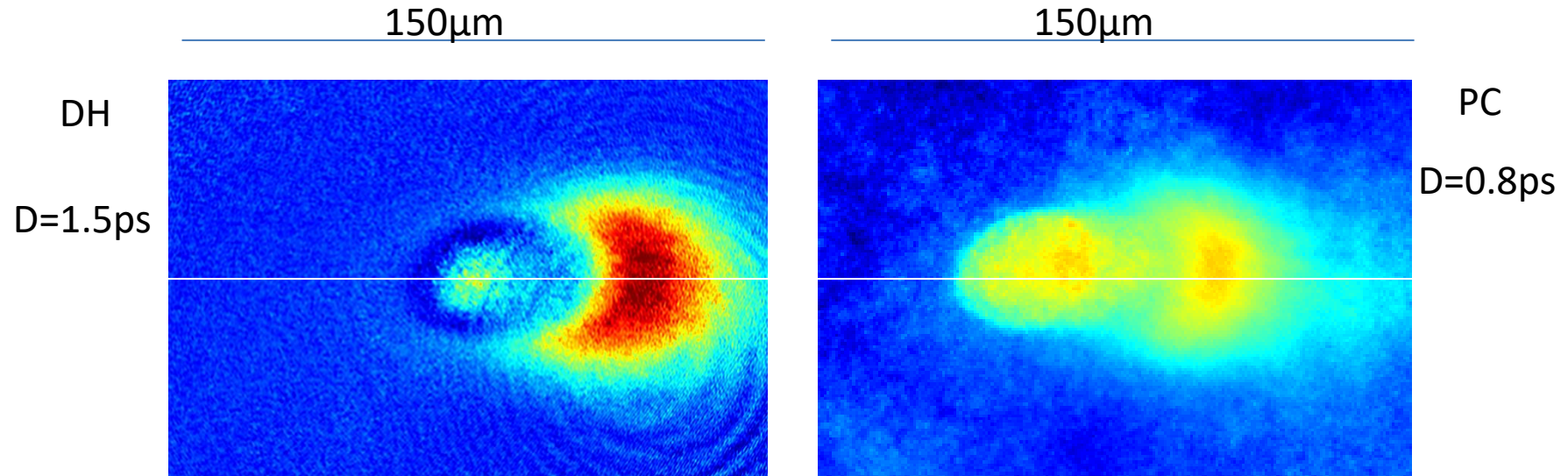
# Comparative measurements



# Comparative measurements

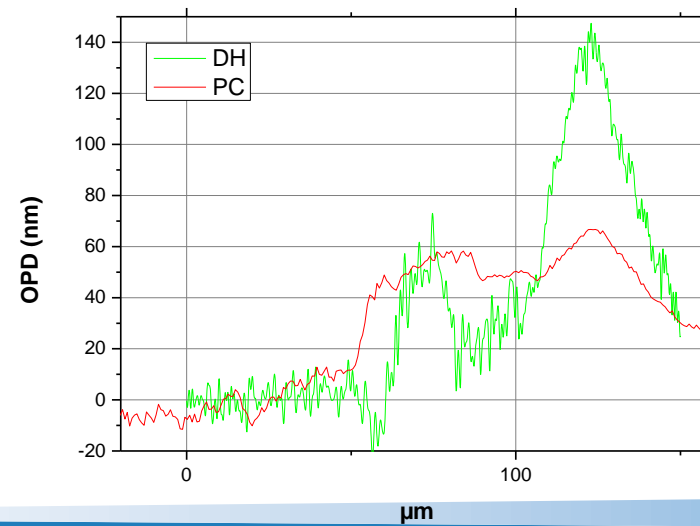
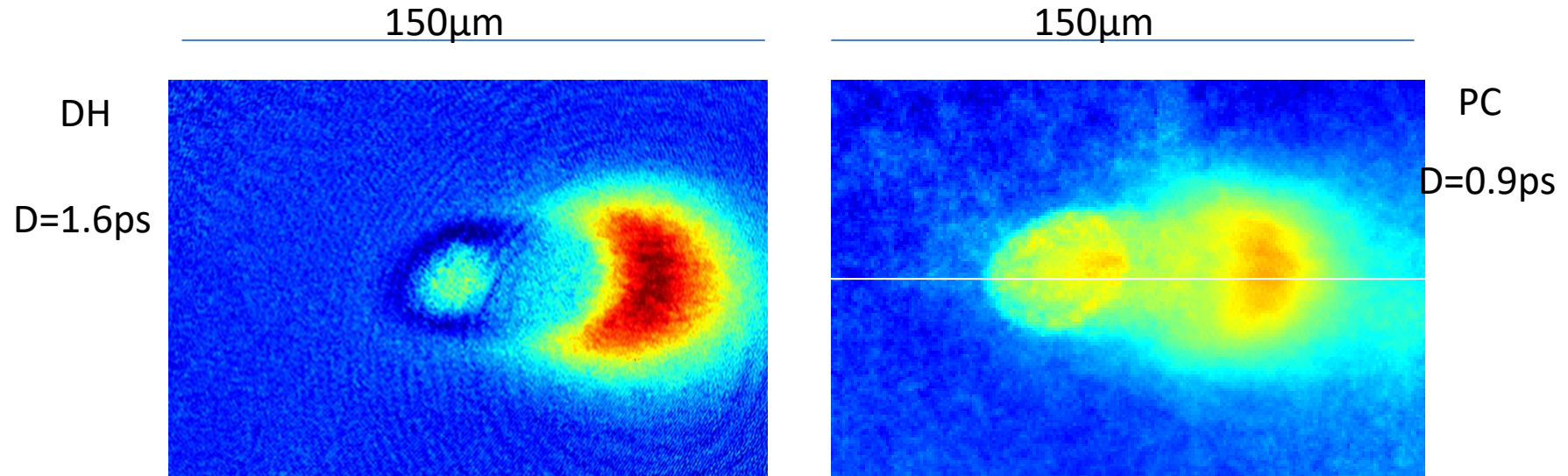


# Comparative measurements

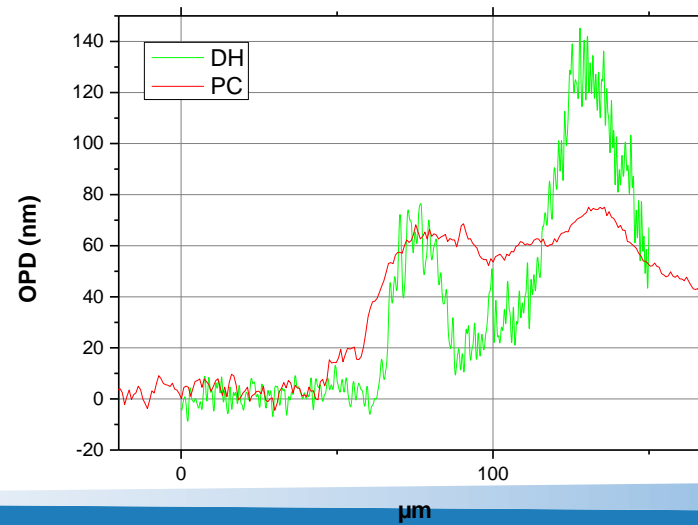
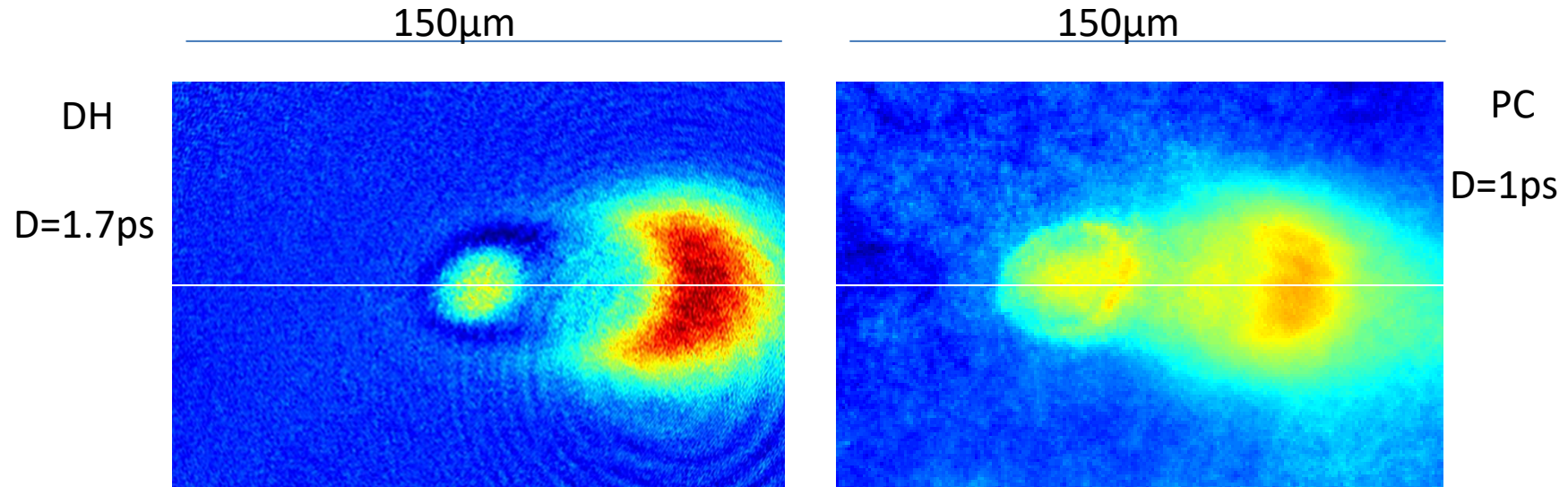




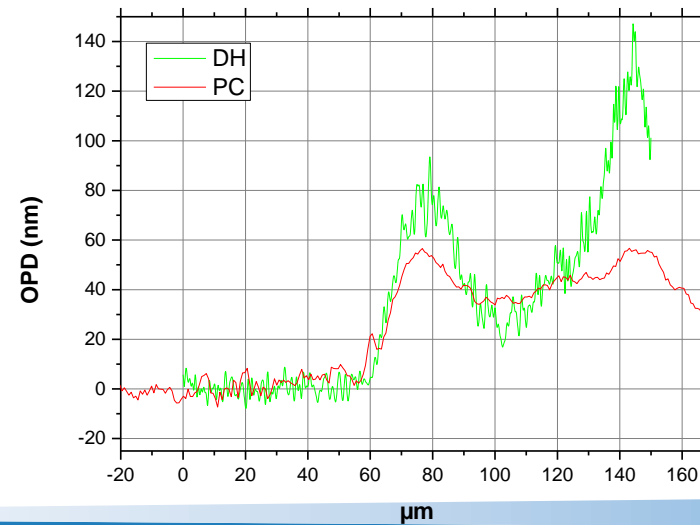
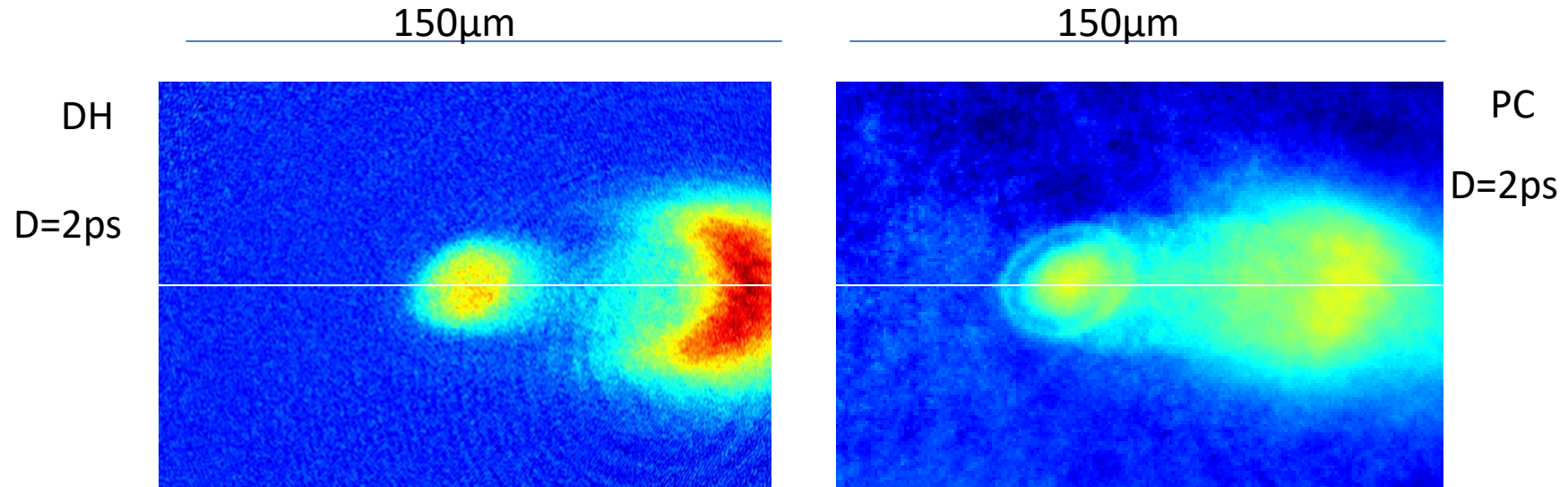
# Comparative measurements



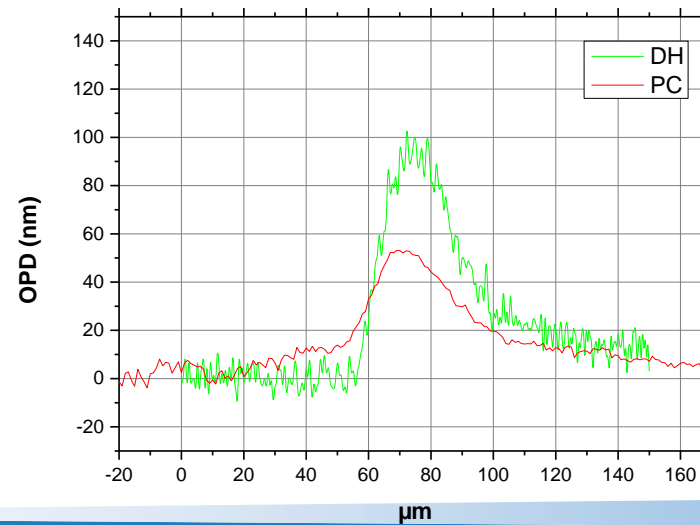
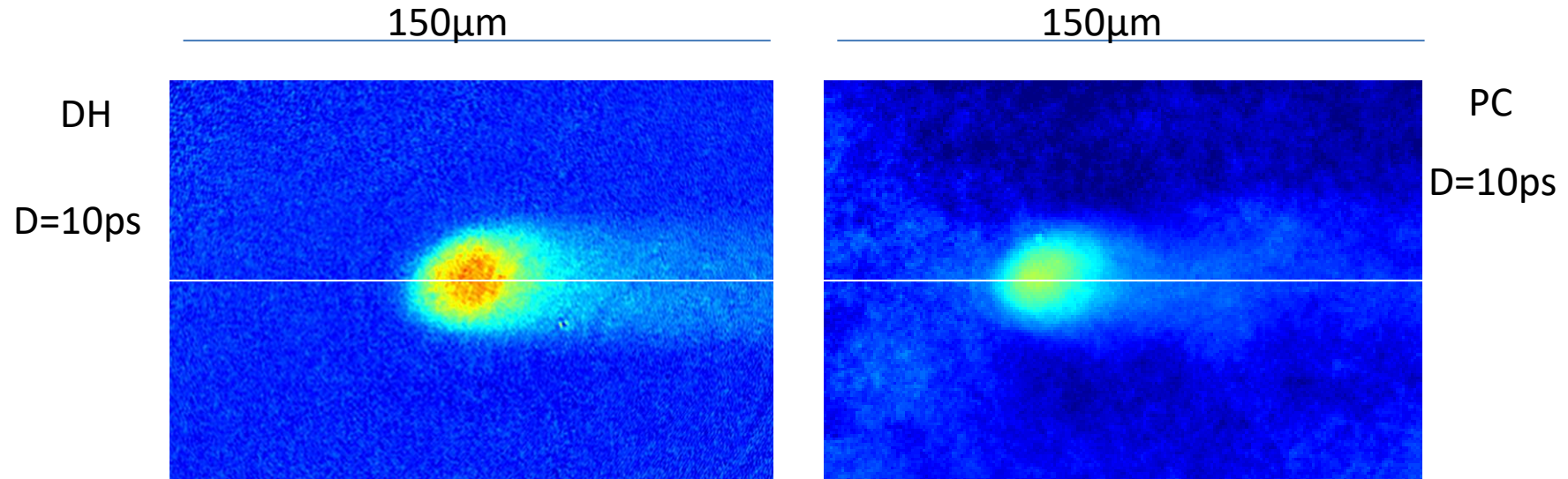
# Comparative measurements



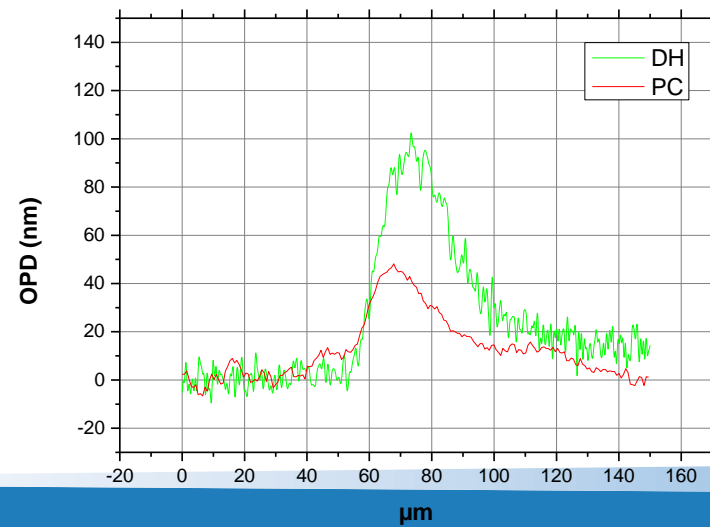
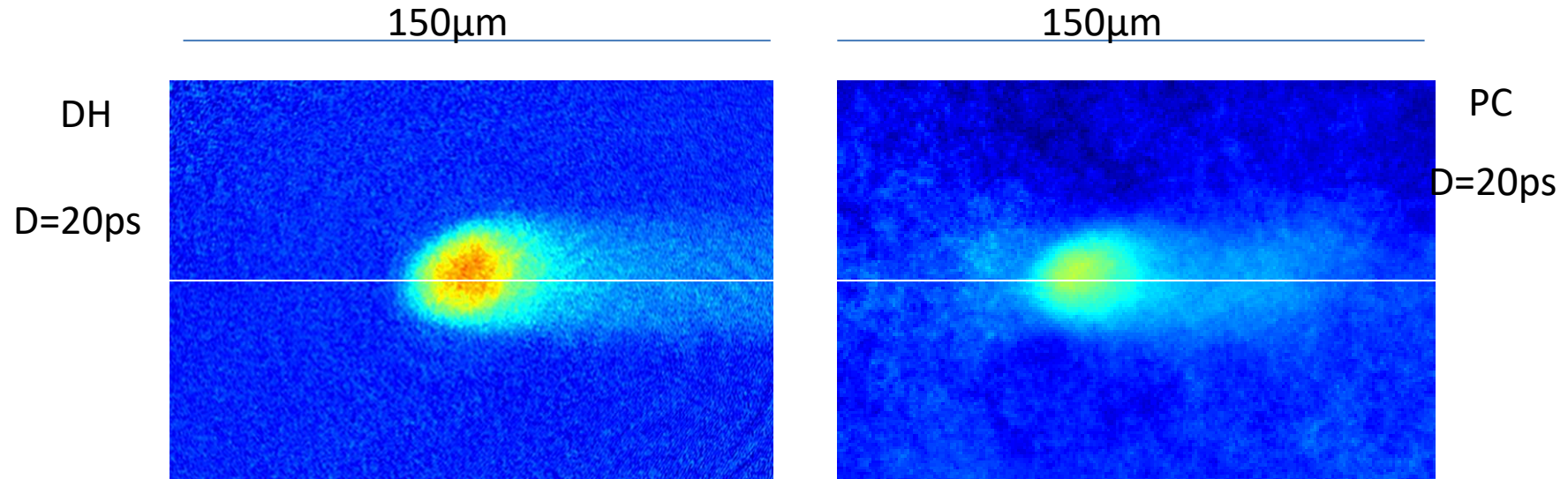
# Comparative measurements



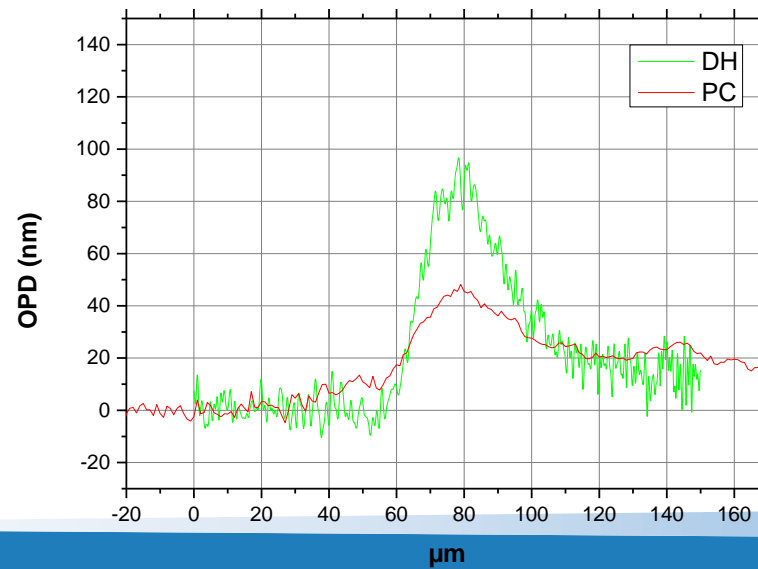
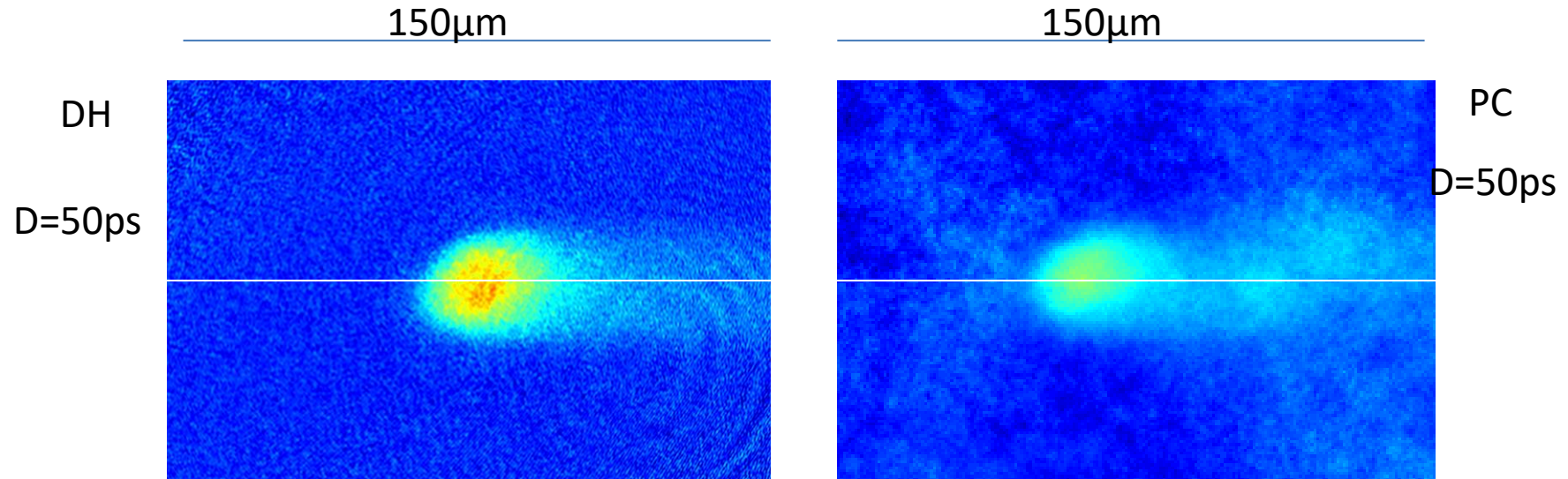
# Comparative measurements



# Comparative measurements



# Comparative measurements



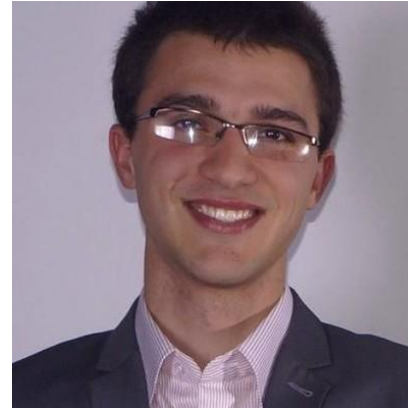
# Conclusions

- La microscopie de phase quantitative basée sur la technique IDML est une technique très puissante pour analyser les modifications, permanents ou transitoires, de matériaux soumis à de forts flux laser.
  - La mesure de phase est un apport essentiel pour les modèles physiques
  - Potentiel peu exploité dans le domaine
- Quelques limitations rencontrées dans ces études:
  - Difficultés de reconstructions dans le cas de forts gradients
  - Valeur quantitative de la phase
  - Problématique de la stabilité du faisceau laser de sonde
  - Ne fonctionne pas sur les surfaces rugueuses
  - Résolution

Merci de votre attention



Dam-Bé Douti



Alexandre Ollé



Thomas Doualle



Rohan Radhakrishnan



# Session 5: Contrôle Non Destructif & Caractérisation

*Chairman : Adrien Stolidi*

- *Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase par rayons X. Georges Giakoumakis, ONERA*
- *Imagerie de phase par IDML sur source de rayons X laser-Plasma. Amélie Ferré, LP3*
- *Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude de l'interaction laser – matière. Laurent Gallais, Institut Fresnel*
- *Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie. Aurélien Houard, LOA*



1 re Rencontre pour l'Interférométrie   Décalage MultiLatéral

## **Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie**

---

Aurélien Houard

Laboratoire D'Optique Appliquée

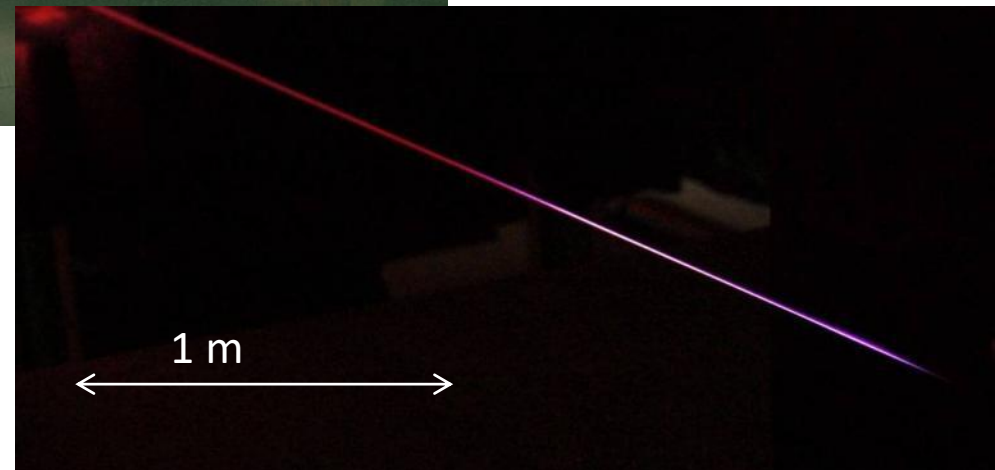
# Plan de la présentation

- Filamentation laser femtoseconde dans l'air
  - Quelques applications
  - Caractérisation du filament
- Exemples d'utilisations du SID4
  - Perche supersonique
  - Filamentation à haute cadence et guidage de décharges
  - Guide d'onde dans l'air
- Perspectives

# Premières expériences au LOA



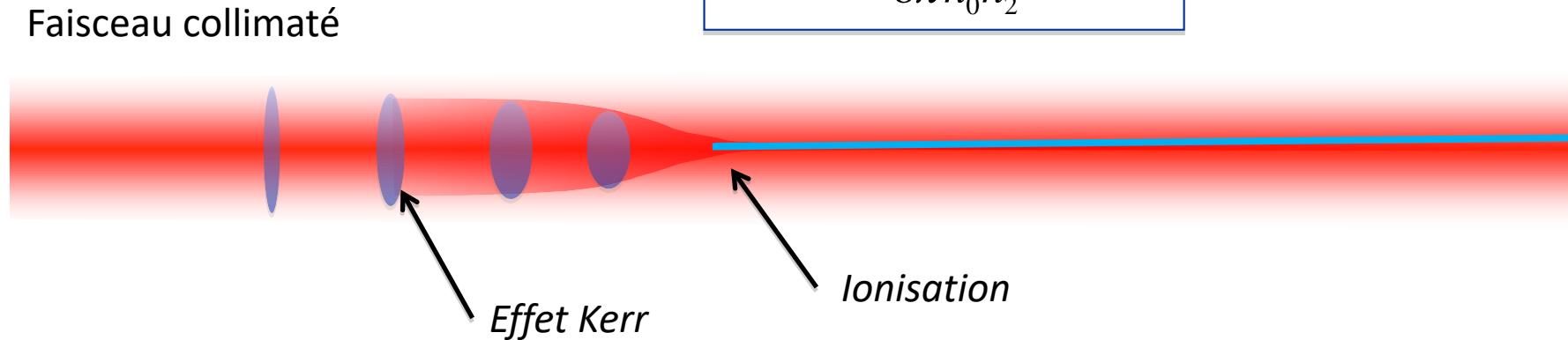
1. Auto-focalisation du faisceau due à l'effet Kerr
2. Formation d'une colonne de plasma



# Filamentation optique dans l'air

$$P > P_{cr} = \frac{3,72\lambda^2}{8\pi n_0 n_2} \approx 5\text{GW}$$

Dans l'air à 800 nm



## Propagation non linéaire : formation d'un filament

Braun et al. en 1995 (CUOS)  
Nibbering et al. en 1996 (LOA)

Compétition dynamique entre :

- Auto-focalisation par effet Kerr
- Diffraction
- Absorption multiphotonique
- Défocalisation par le plasma

➔ Intensité élevée dans le cœur du filament

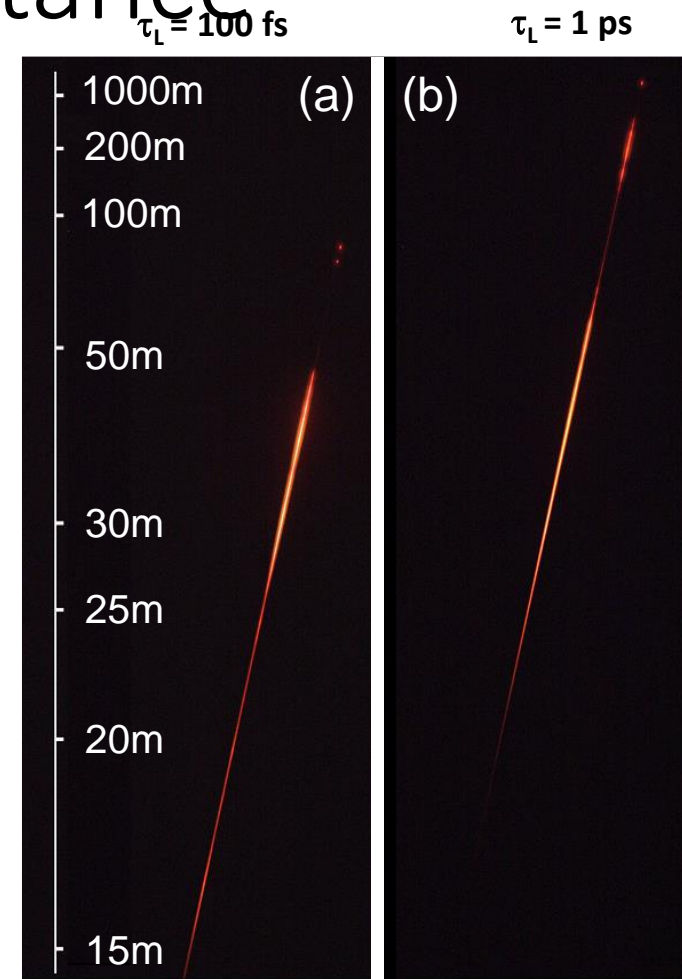
➔ Canal de plasma long et uniforme ( $10^{16}$  e-/cm<sup>3</sup>)

# Filamentation à longue distance

-> Permet de générer une intensité élevée à grande distance sans système de focalisation complexe et avec une énergie laser modéré (1-100 mJ)



Filamentation observée jusqu'à 1 km  
(« *Kilometer range filamentation,* »  
*M. Durand et al. Opt. Exp. 2013*)



Luminescence des filaments de plasma  
(Teramobile project, 2004)

# Applications des filaments

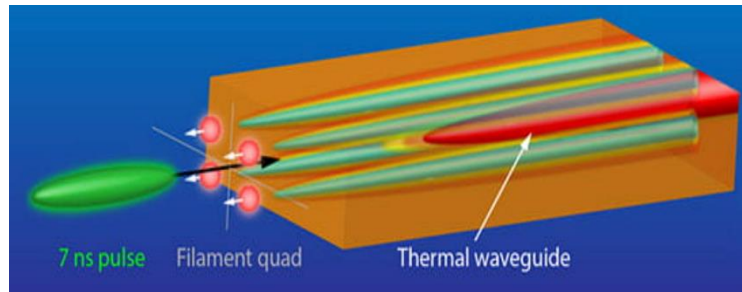
Perche supersonique



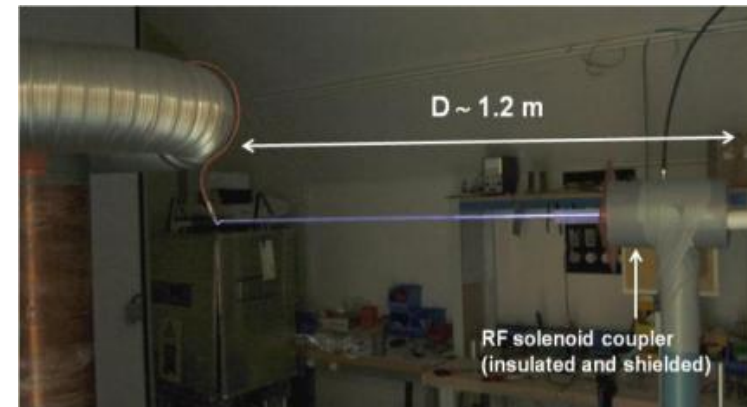
Paratonnerre laser



Guide d'onde optique



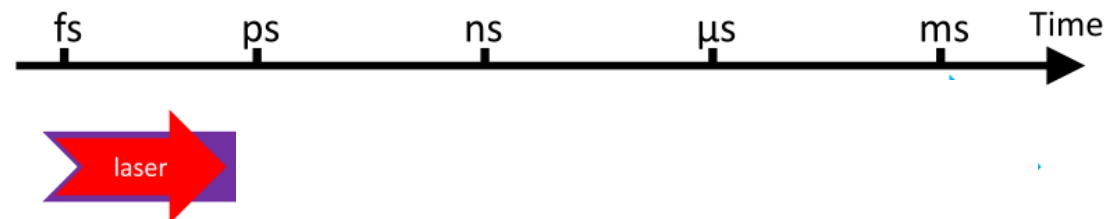
Antenne plasma RF



# Filamentation : échelles de temps

## 1. Impulsion laser femtoseconde

1. Propagation non-linéaire (Effet Kerr, Raman..)
2. Ionisation : génération de la colonne de plasma dans le sillage de l'impulsion





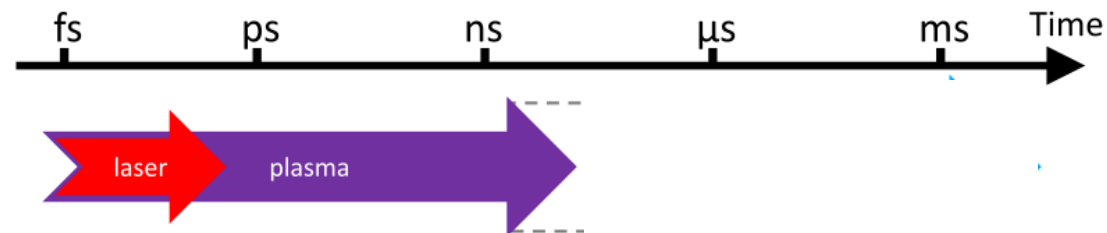
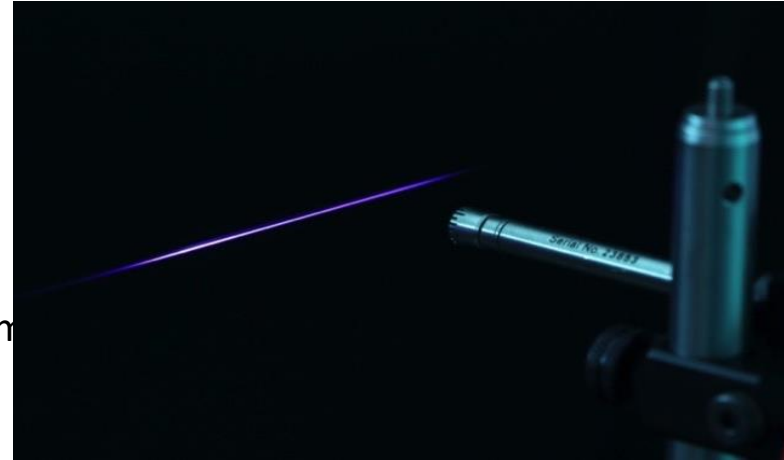
# Filamentation : échelles de temps

## 1. Impulsion laser femtoseconde

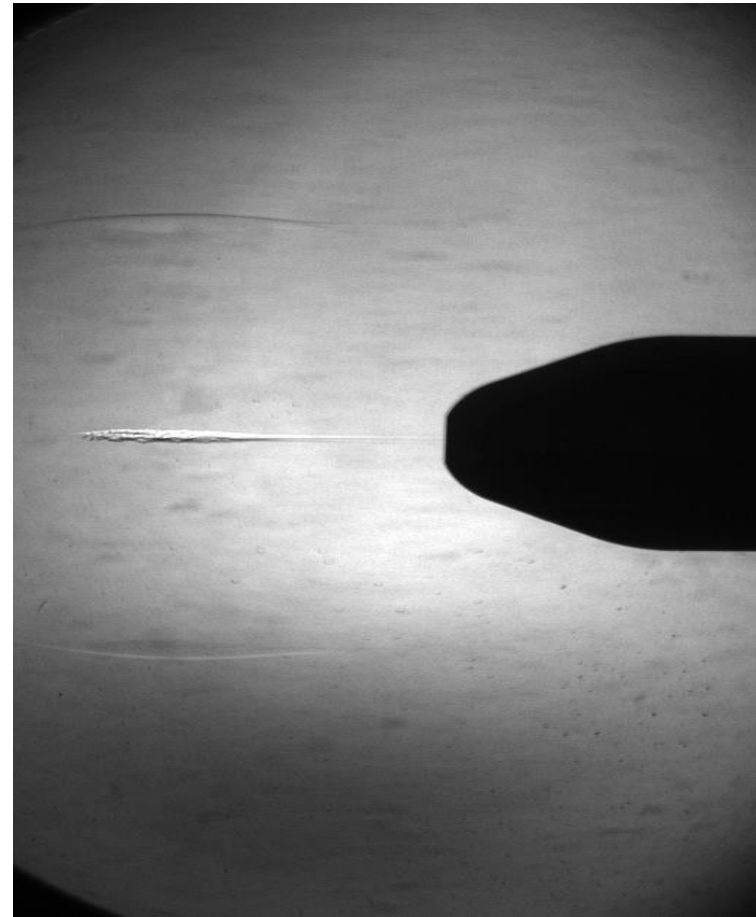
1. Ionisation : génération de la colonne de plasma dans le sillage de l'impulsion
2. Propagation non-linéaire

## 2. Evolution du plasma (ps-ns)

1. Oscillation du plasma (fréquence  $\sim 1$  THz)
2. Collisions électroniques et recombinaison du plasma (1-100 ps)



# Filamentation : échelles de temps



## 1. Impulsion laser femtoseconde

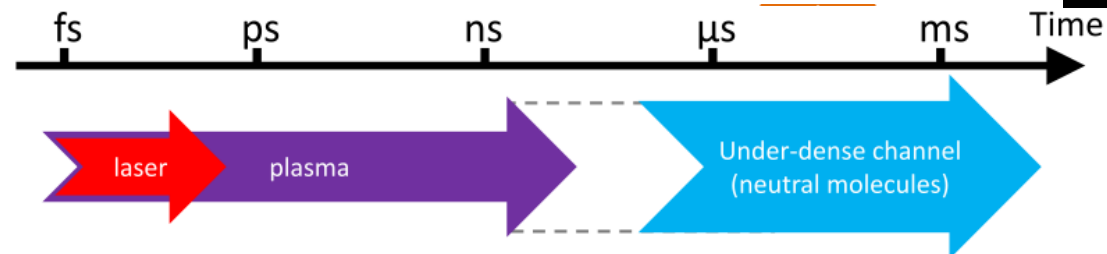
1. Ionisation : génération de la colonne de plasma dans le sillage de l'impulsion
2. Propagation non-linéaire

## 2. Evolution du plasma (ps-ns)

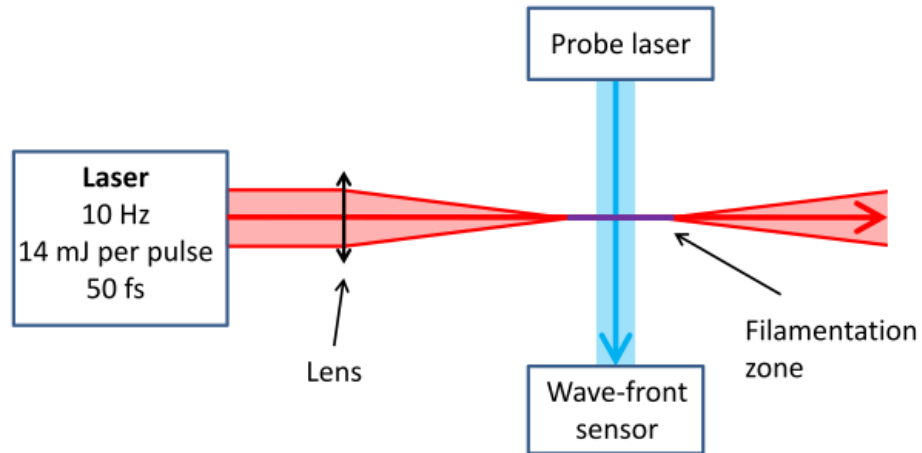
1. Oscillation du plasma (fréquence  $\sim 1$  THz)
2. Collisions électroniques et recombinaison du plasma

## 3. Effets hydrodynamiques : canal de basse densité ( $\mu\text{s}$ )

1. Onde de pression/densité pour relaxer le système
2. Diffusion du canal de basse densité (millisecondes)



# Caractérisation interférométrique de l'évolution du filament



Variation d'indice due au filament

$$n_p = 1 - \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} n_e + \beta \frac{n_n}{n_0}$$

- Pump laser: 50 fs, 14 mJ , 800 nm, 1Hz.
- Probe laser: Nd:YAG, 8 ns, 100  $\mu$ J, 532 nm, 1 Hz.

# Mesure du canal de plasma

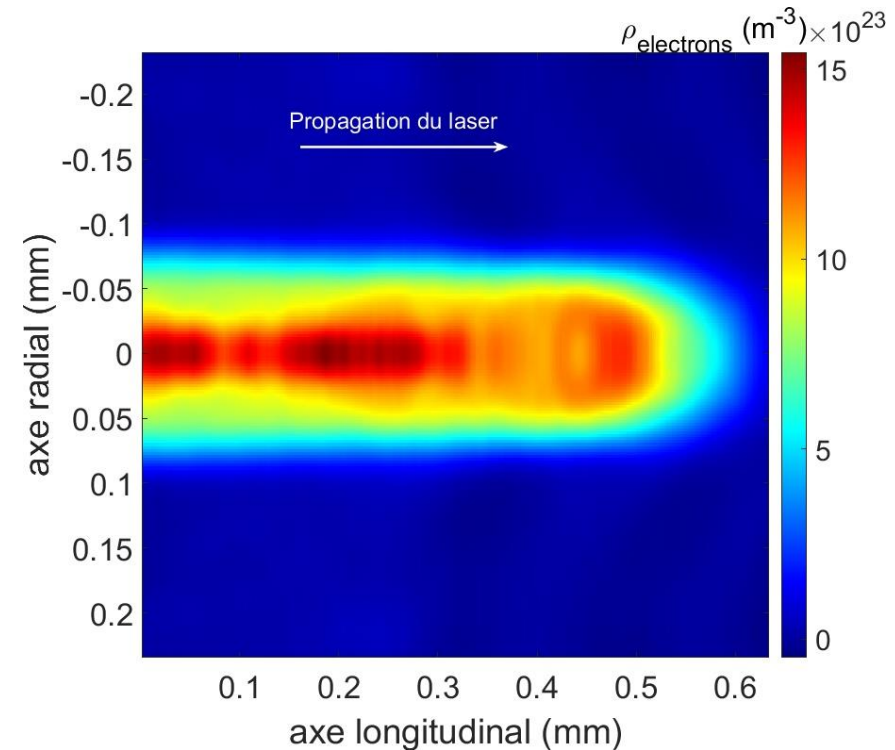
Variation d'indice due au filament

$$n_p = 1 - \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} n_e + \beta \frac{n_n}{n_0}$$

Aux temps courts (< ns)

$$n_n \approx n_0 \rightarrow \int_{s_1}^{s_2} n_e(s) ds = \frac{\Delta\varphi}{r_e \lambda}$$

Laser sonde femtoseconde à 800 nm



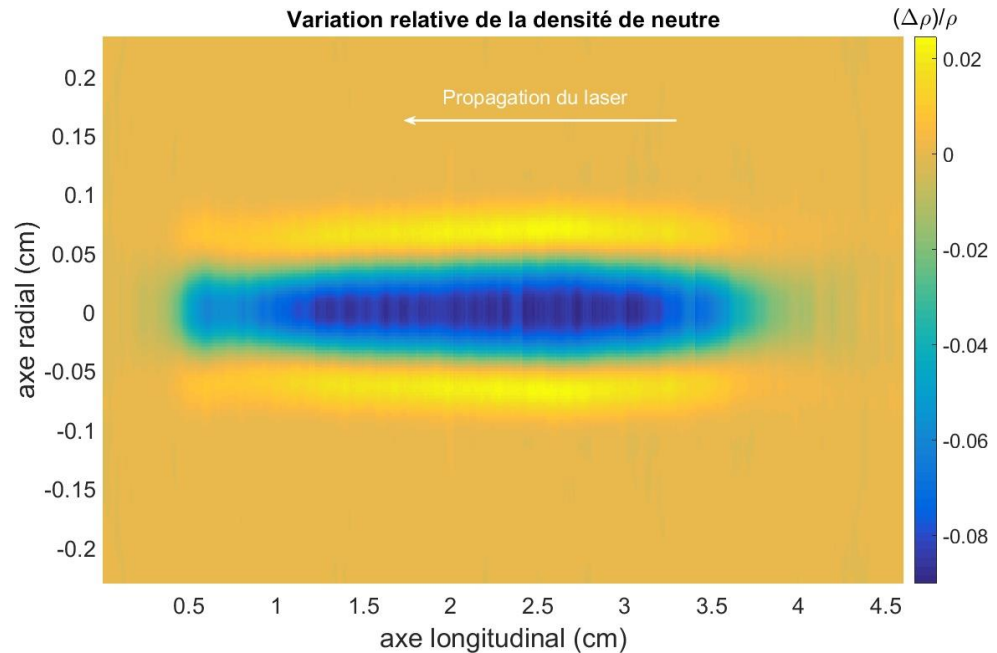
Densité électronique :  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

# Mesure aux temps longs : Canal sous-dense

Mesure à  $t = 10 \mu\text{s}$

Index variation due to the filament

$$n_p = 1 - \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} n_e + \beta \frac{n_n}{n_0}$$



Aux temps longs ( $> \mu\text{s}$ )

$$n_e \approx 0 \rightarrow \int_{s_1}^{s_2} (n_n(s) - n_0) ds = \frac{n_0}{2\pi\beta} \lambda \Delta\varphi$$

# Perche laser supersonique (ANR Astrid 2017)



Utiliser le filament pour effectuer un dépôt d'énergie linéaire en amont d'une onde de choc créée par un véhicule supersonique

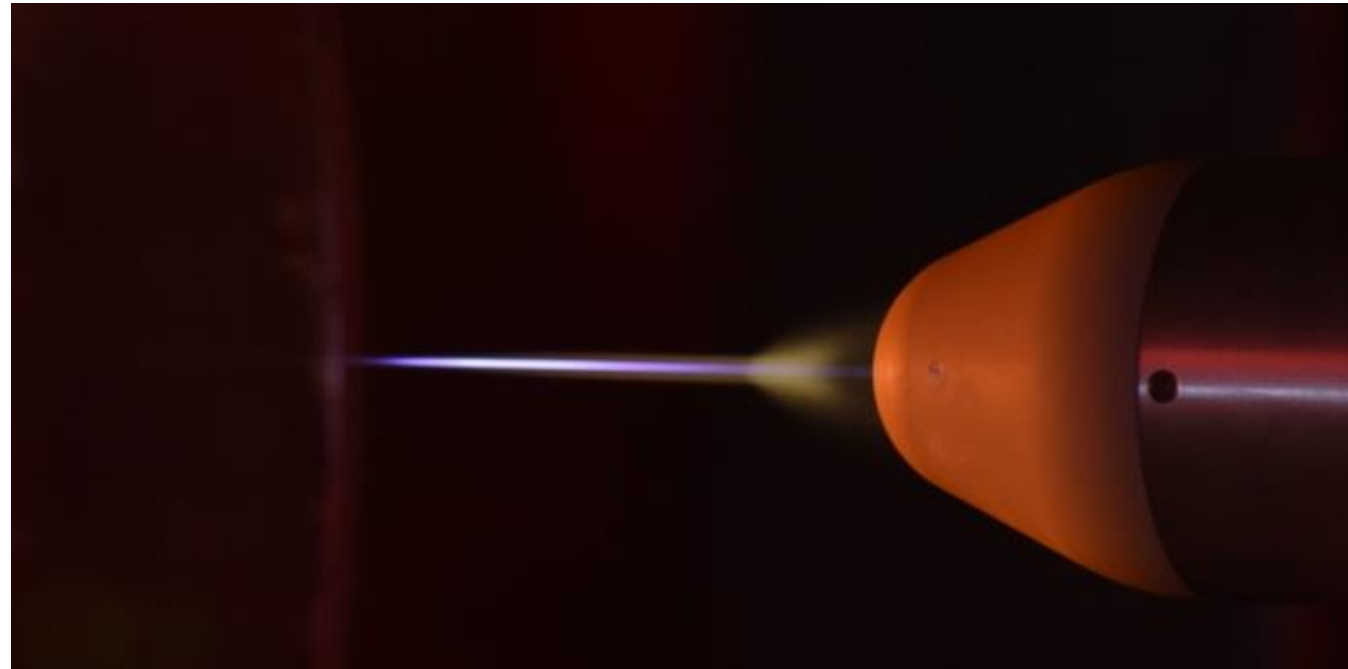
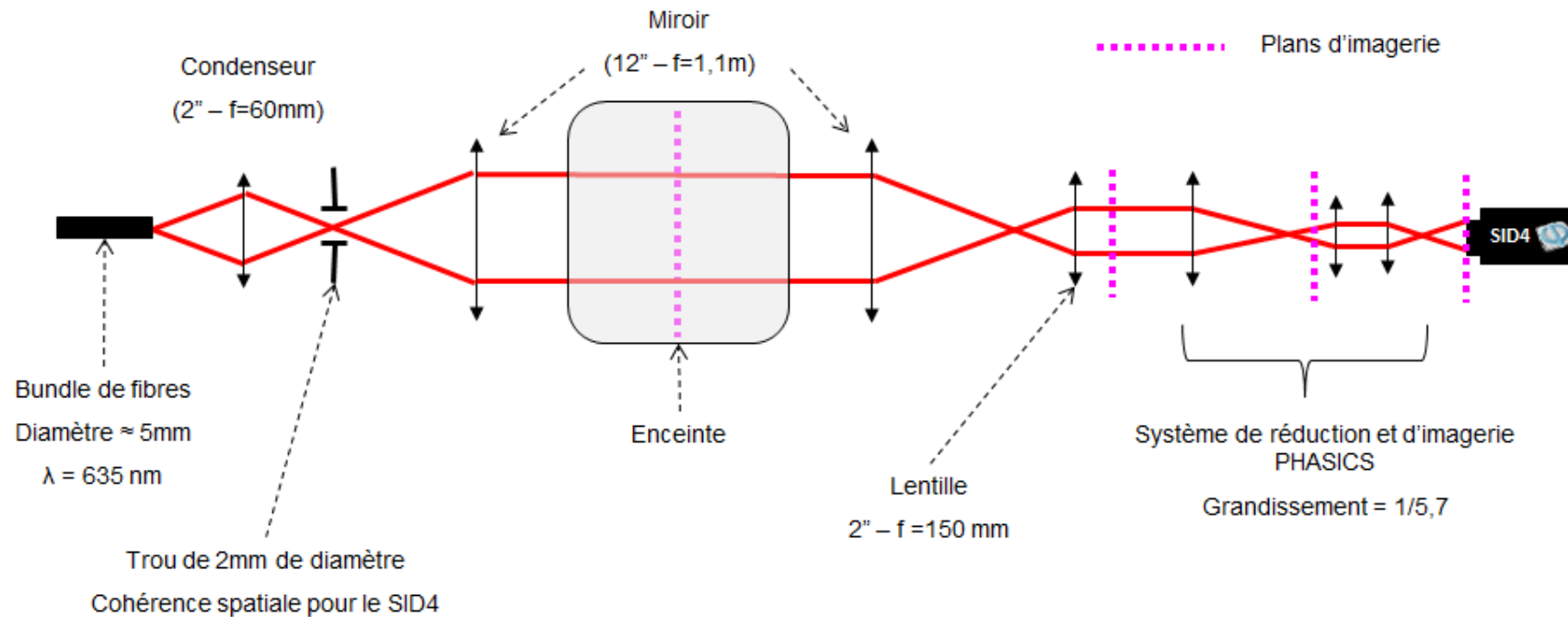


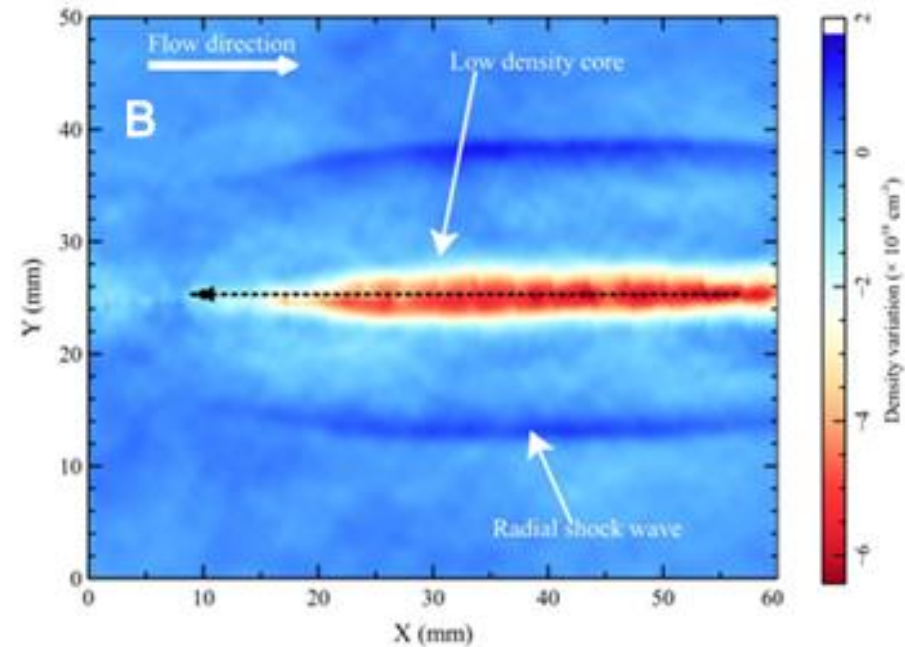
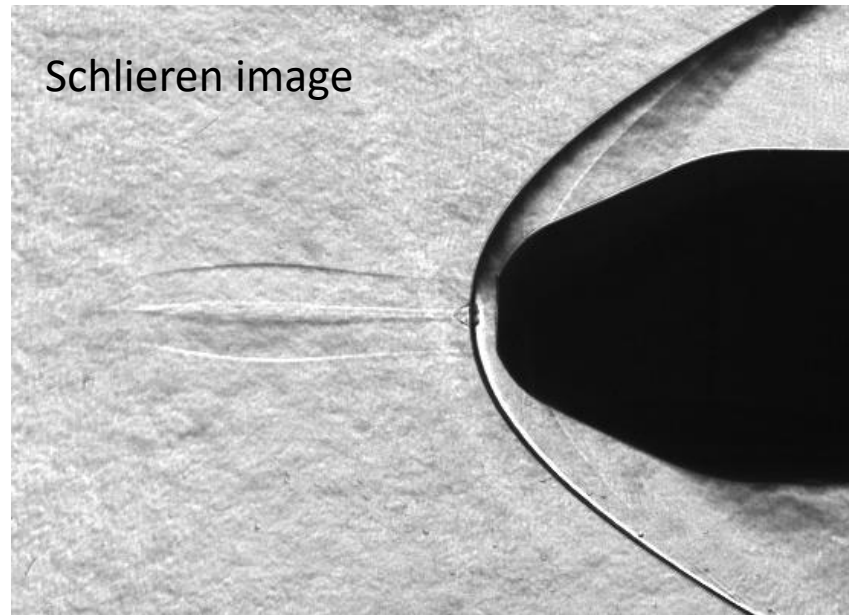
Photo intégrée du filament en présence de l'écoulement supersonique

# Montage permettant l'imagerie du filament et de l'onde de choc



# Mesure de densité dans l'écoulement supersonique

Mesure directe de densité en utilisant un senseur de front d'onde



Laser-induced disturbance with Mach 3 air flow

➔ Estimated deposited energy: 10-15 mJ

« Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation, »  
P.-Q. Elias, *et al.* Science Advances **4**, eaau5239 (2018)



# Effet du filament laser sur l'onde de choc

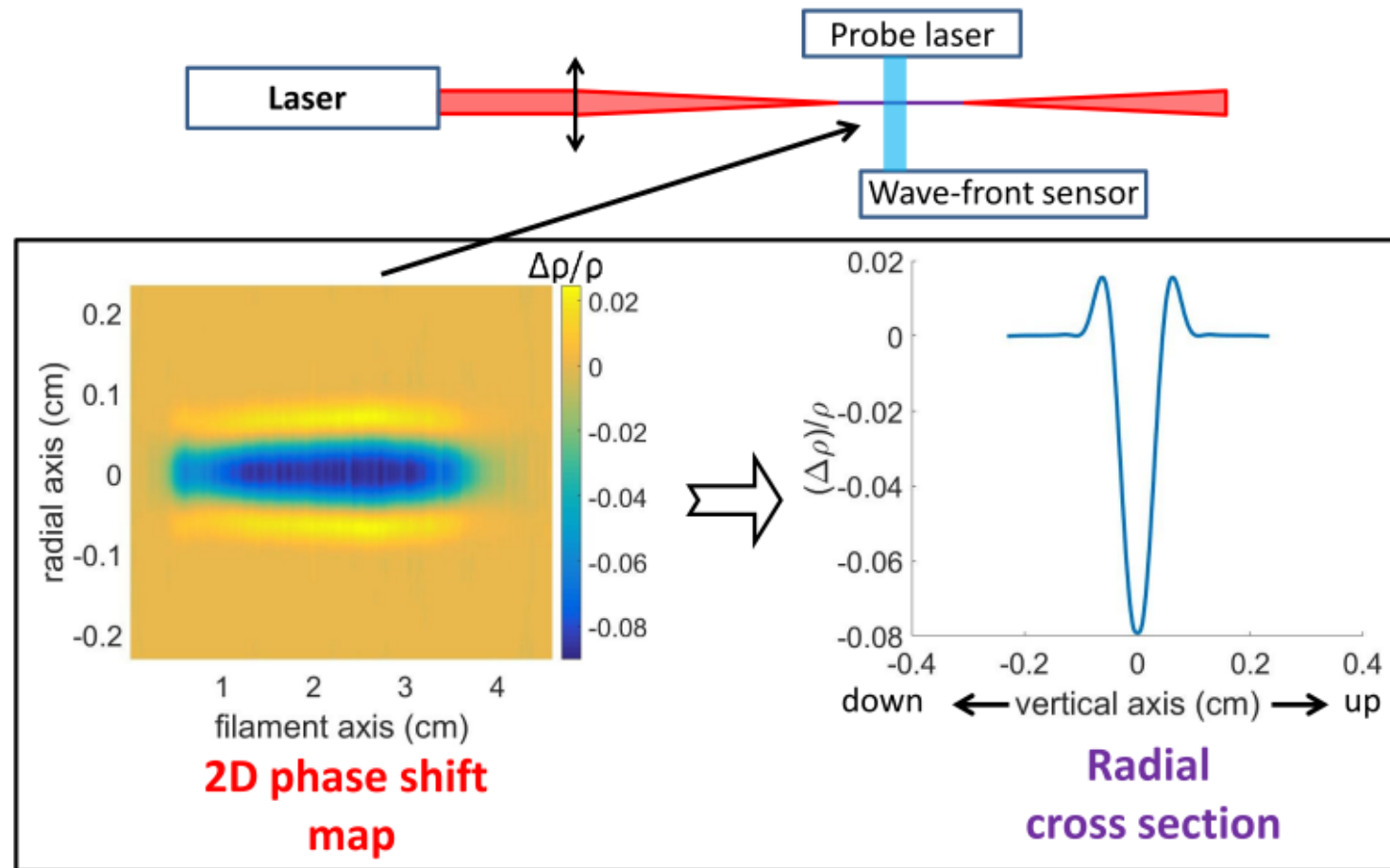


Réduction de la traînée de 50 %

- Effet transitoire
- Besoin de haute-cadence

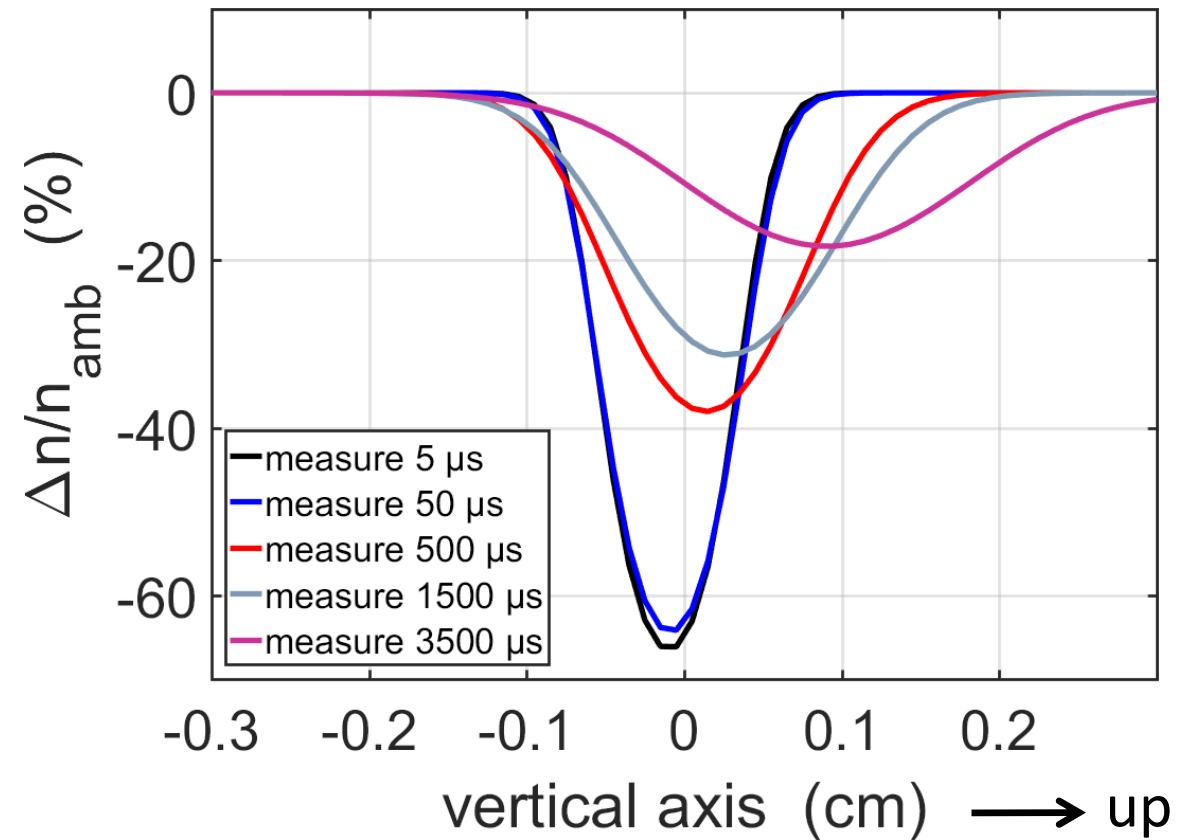
P.-Q. Elias, *et al.* Science  
Advances **4**, eaau5239 (2018)

# Evolution temporelle du canal sous-dense

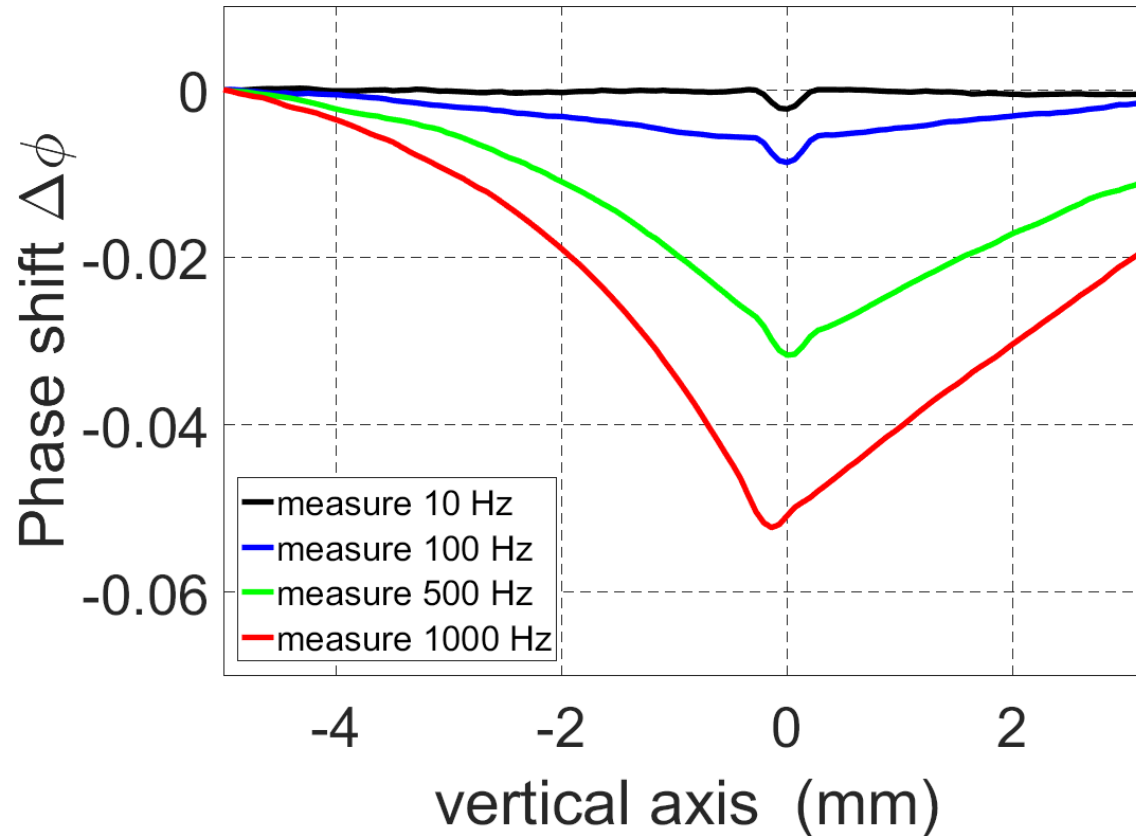


# Evolution temporelle du canal sous-dense

Radial profile of the under-dense channel resulting from the filamentation of a 14 mJ, 50 fs laser pulse focused at f/33.



# Filamentation à haute cadence



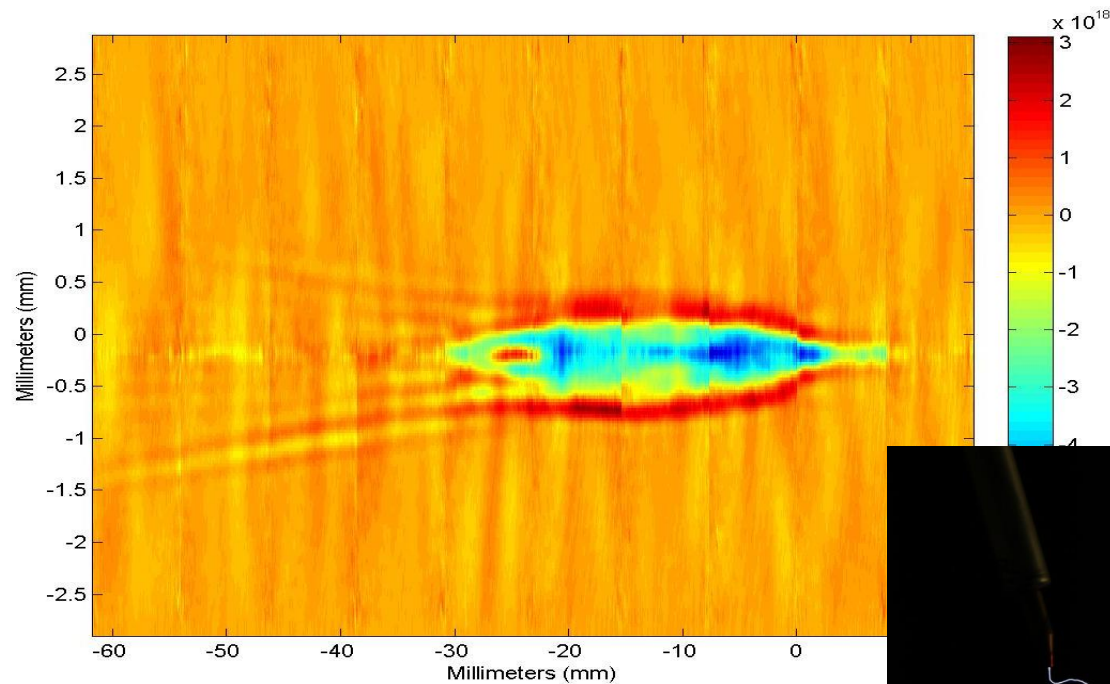
Apparition d'un canal sous-dense asymétrique de taille centimétrique à haute cadence

P. Walch et al., *Appl. Phys. Lett.* **119**, 264101 (2021).

# Impulsion TW : Régime de multi-filamentation

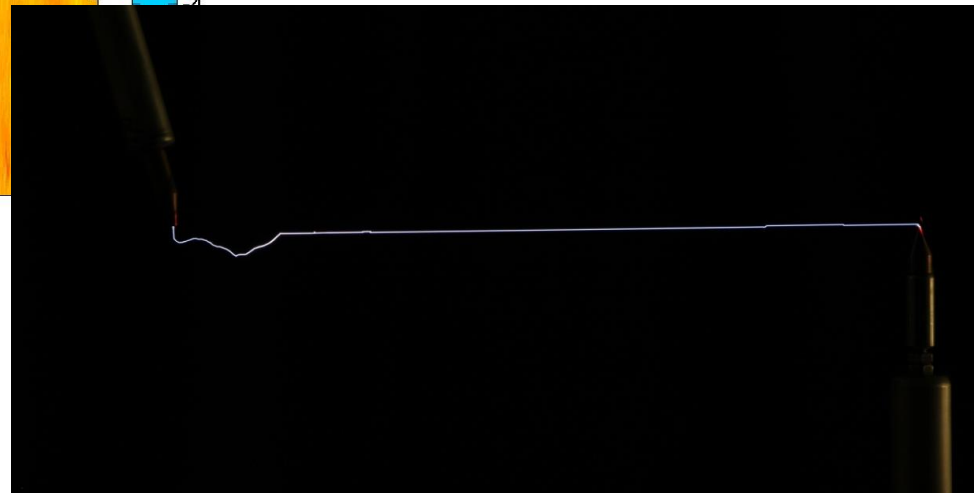
$E = 100 \text{ mJ}$ ,  $\tau = 50 \text{ fs}$ ,  $F = 1 \text{ m}$ ,  $p = 200 \text{ mbar}$

Measured density profile along  $z$  at  $t = 1 \mu\text{s}$  after ionization



**Lineic deposited energy  $> 1 \text{ mJ/cm}$**   
**Neutral temperature  $> 1000 \text{ K}$**

G. Point, et al., Superfilamentation in Air,  
*Phys. Rev. Lett.* **112**, 223902 (2014).



# The Laser lightning Rod project

Coordinated by LOA, 4 Meuros, 4 years, Started in 2017



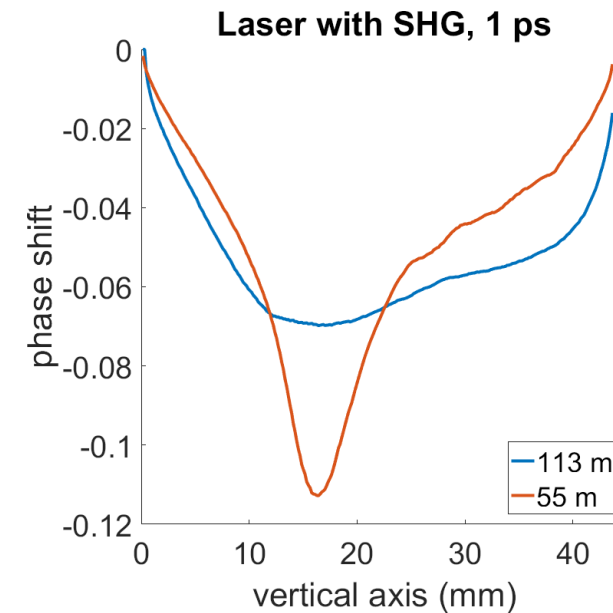
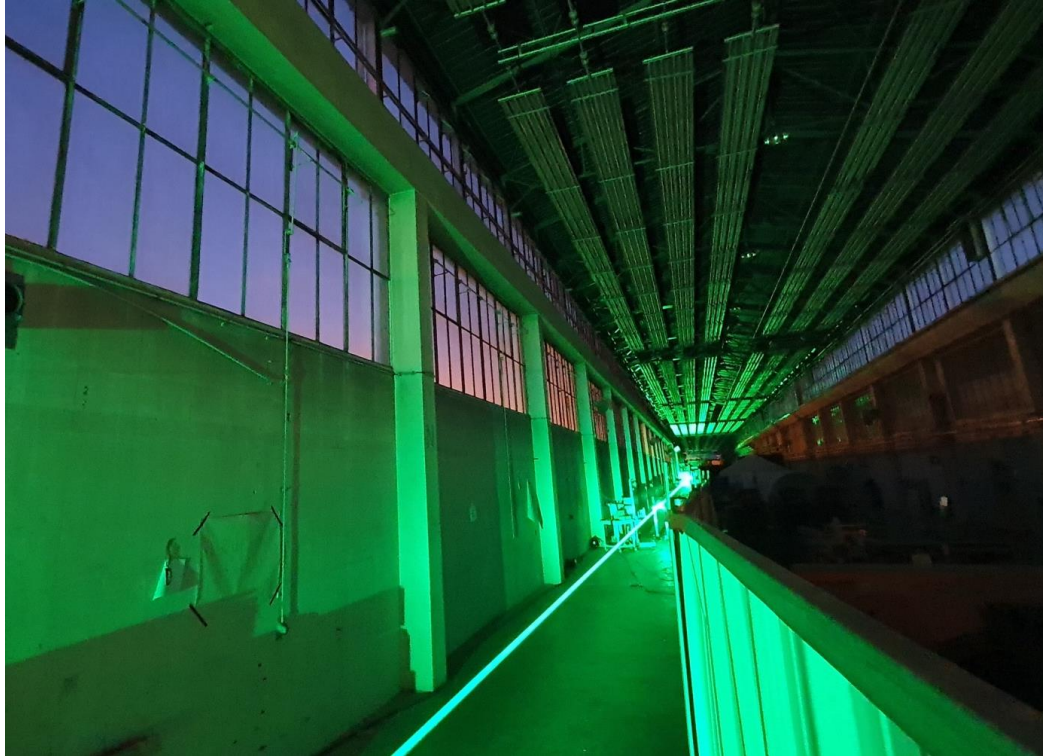
Photo @Trumpf/Martin Stollberg

## Meteorological station of Mount Säntis (Switzerland)

- Altitude 2 500 m
- Fully instrumented for the detection of lightning
- 100 lightning strikes every year
- 97% of events are upward lightning leaders



# Filamentation laser TW avec un laser



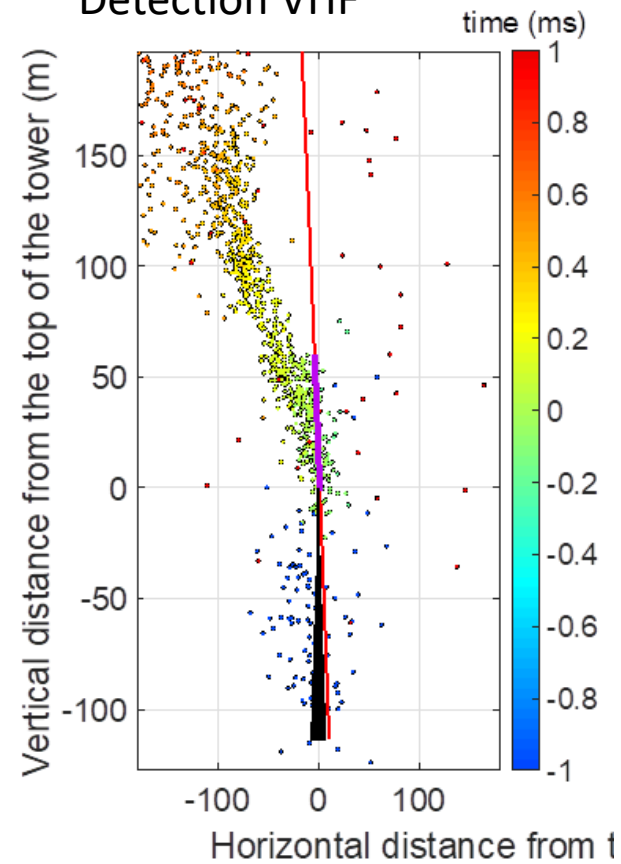
Caractérisation des filaments produits par un laser de 500 mJ à 1 kHz à 100 m pour le projet Laser Lightning Rod

# Guidage de la foudre par laser

Image caméra rapide



Détection VHF



A. Houard et al., **Laser-guided lightning**, Nature Photonics **17**, 231 (2023)

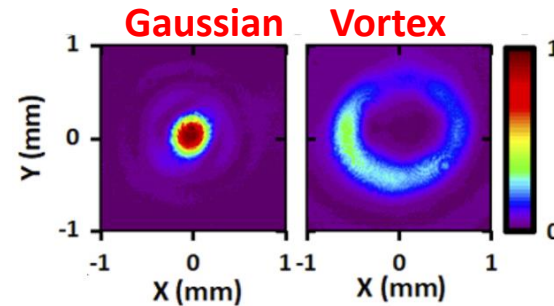


# Guide d'onde optique dans l'air

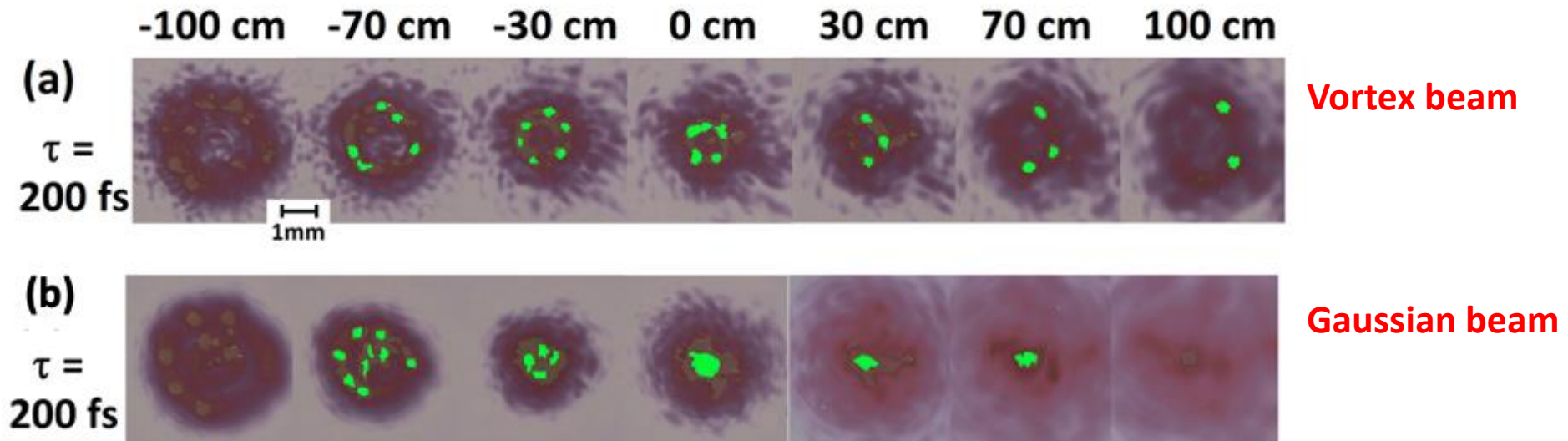
## Filamentation avec des faisceaux de Laguerre

GAUSS Utilisation d'une lame de phase pour générer un faisceau vortex

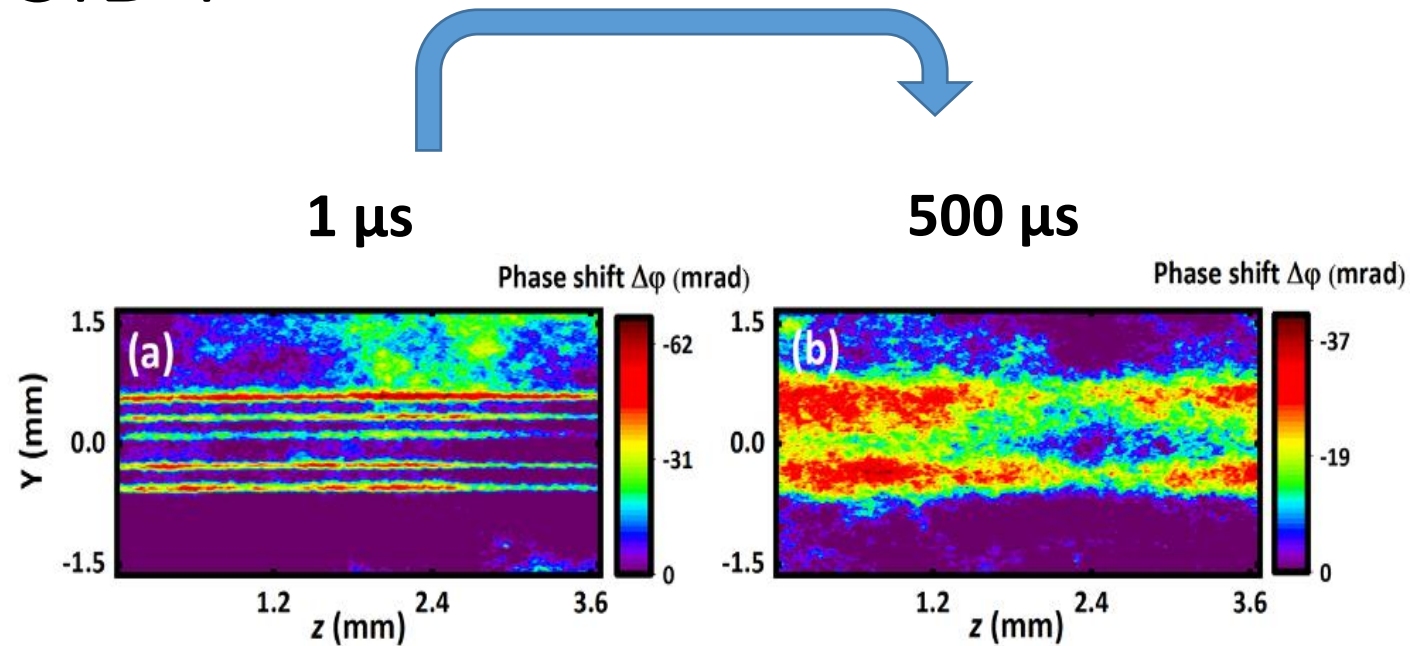
Energy: 25mJ/shot  
4m lens



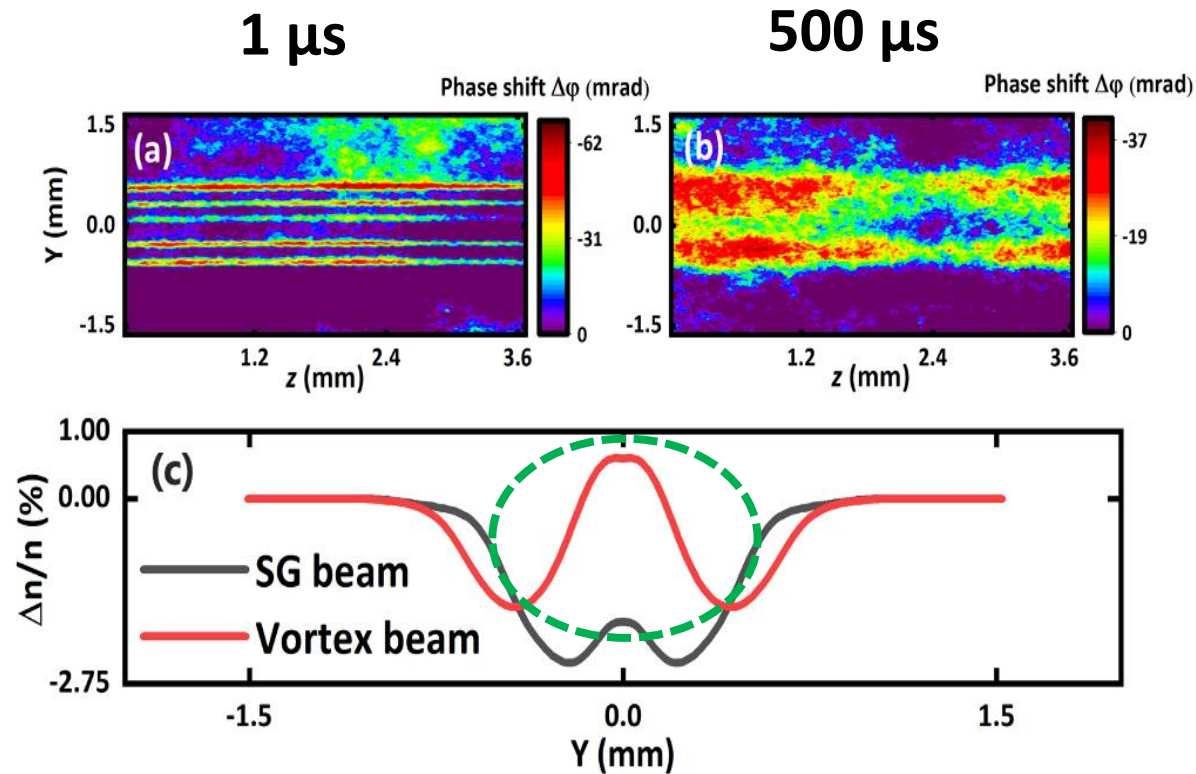
Topological charge  $M = 4$



# Caractérisation du canal sous-dense produit avec le SID4

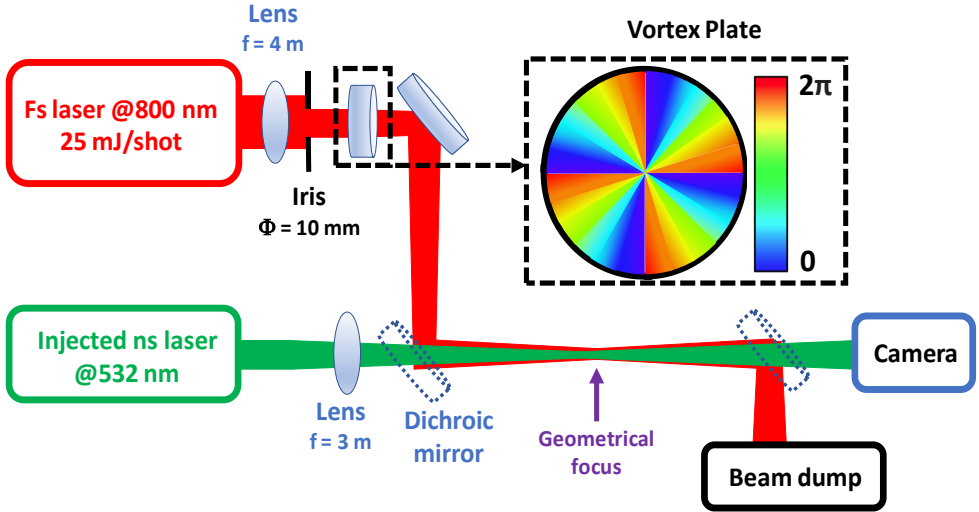


# Caractérisation du canal sous-dense produit avec le SID4

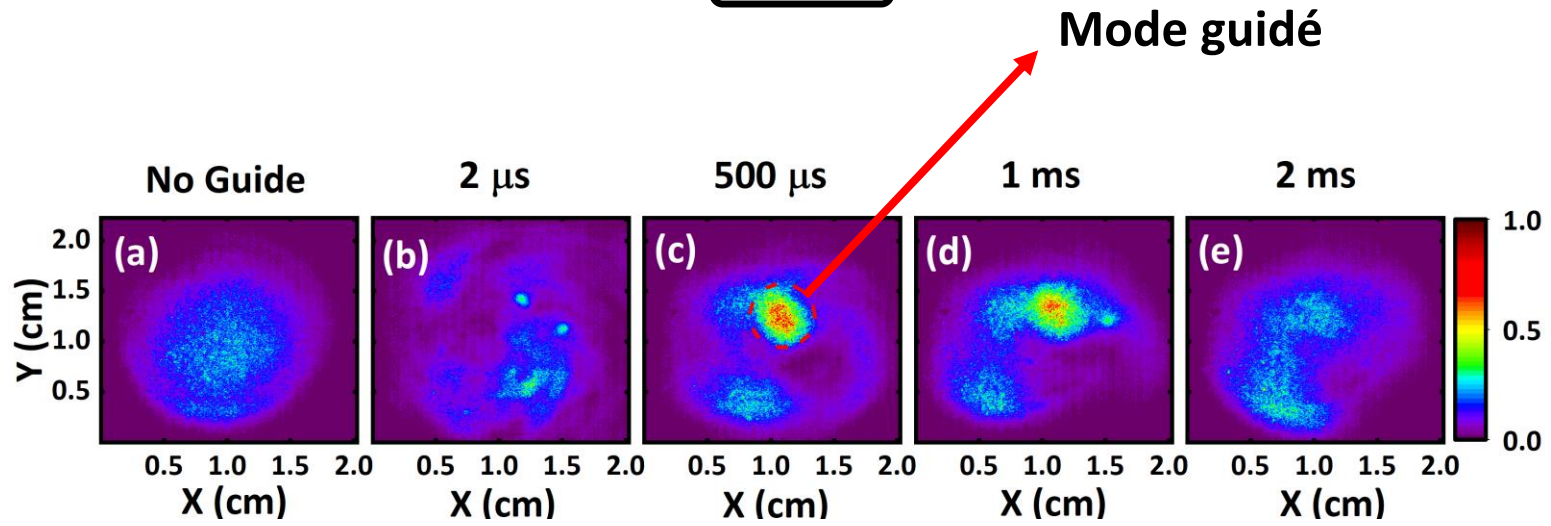


**Variation de densité de l'air (Inversion d'Abel)**

# Démonstration du guide optique



S. Fu, B. Mahieu, A. Mysyrowicz, A. Houard,  
*Femtosecond filamentation of optical vortices  
 for the generation of optical air waveguides,*  
*Optics Letters 47, 5228 (2022)*



# Perspectives

- Tomographie avec SID4 pour la caractérisation 3D de faisceau de multifilaments
- Amélioration du rapport signal/bruit du SID4 pour la caractérisation des filaments longs
- Acquisition à haute cadence pour l'étude d'une perche laser à haute cadence (projet Astrid en cours avec Phasics et ONERA)

# Remerciements



## **Groupe F-ILM (LOA)**

Guillaume Point

Pierre Walch

Benoit Mahieu

Silin Fu

André Mysyrowicz

Yves-Bernard André

Leonid Arantchouk

Laurent Bizet

## **Université de Genève**

Jean-Pierre Wolf

Thomas Produit

Jérôme Kasparian

## **EPFL**

Farhad Rachidi

Marcos Rubinstein

## **Phasics**

Ivan Doudet

Benoit Wattellier

## **ONERA**

Paul-Quentin Elias

Reynald Bur

Nicolas Severac

J.-P. Tobeli



Merci de votre attention

# Conclusion:

- *L'interférométrie à décalage multi-latéral : les origines* **Jérôme Primot**, ONERA





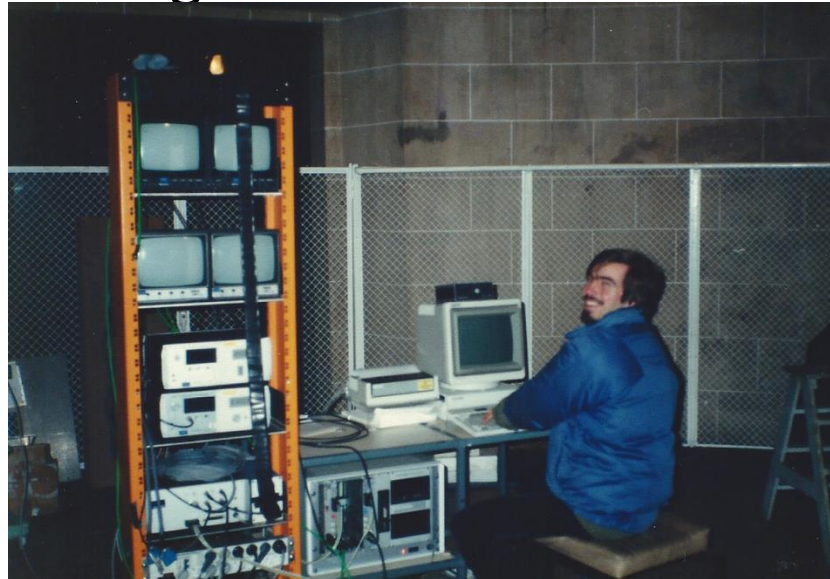
# LES ORIGINES

# Remerciements et conclusion

# Il y a fort longtemps,... au 20<sup>ème</sup> siècle

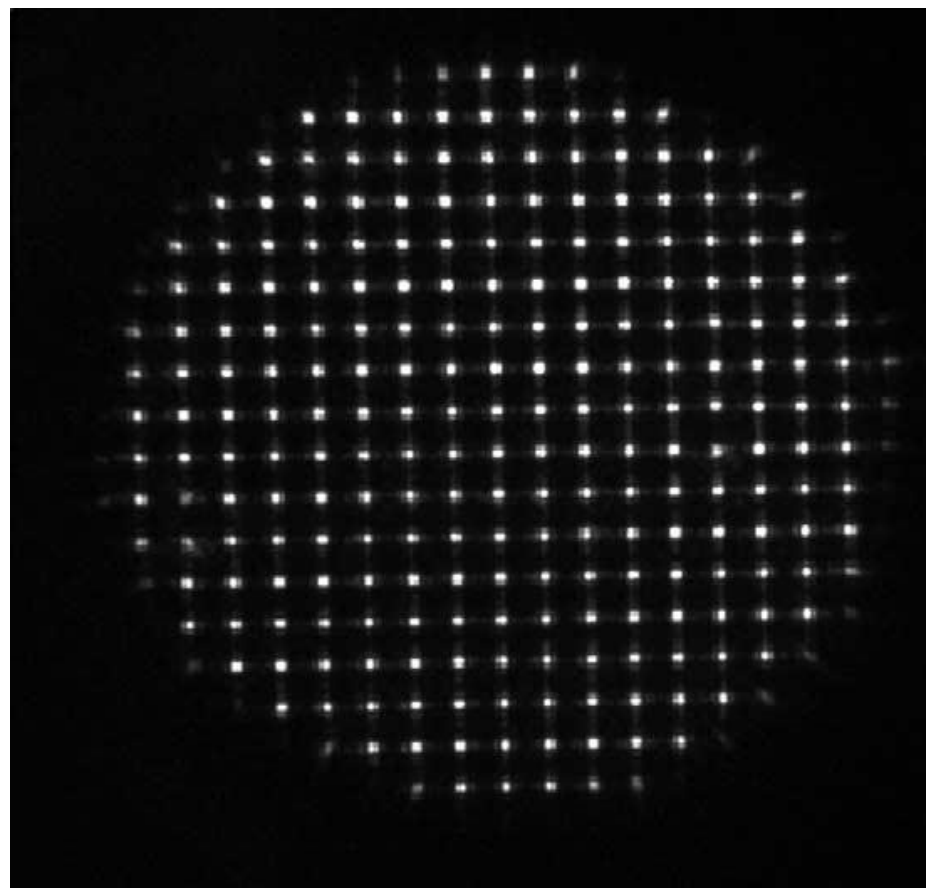
- Thèse « restauration d'images dégradées par la turbulence atmosphérique »

En attendant l'optique adaptative, une idée forte (Fontanella) : utiliser l'analyseur de Shack-Hartmann pour caractériser à tout instant les aberrations du télescope, puis déconvoluer un ensemble d'images



- Technique finalement compétitive avec l'OA, toujours utilisée... par exemple en ophtalmo

Vers le Mégapixel de phase...



# Rédaction de la thèse

- Etat de l'art des techniques d'Analyse de Surface d'Onde
  - Travail de taxonomie
    - Avec un premier souci : qui appartient à la famille des ASO ?

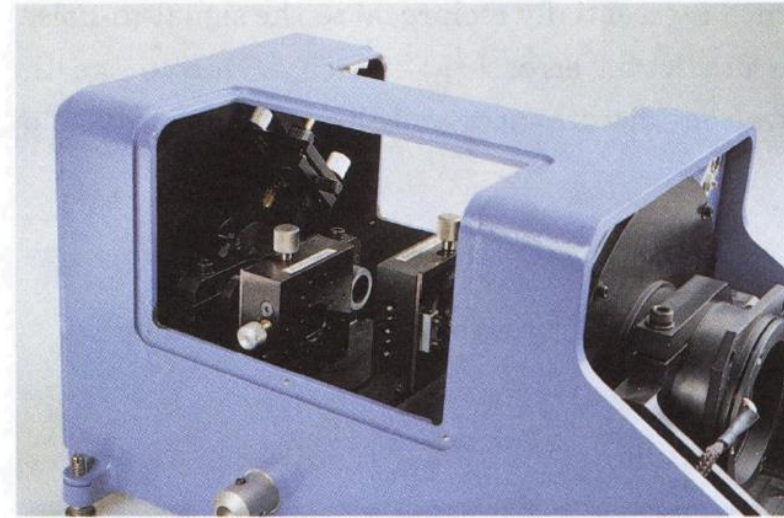
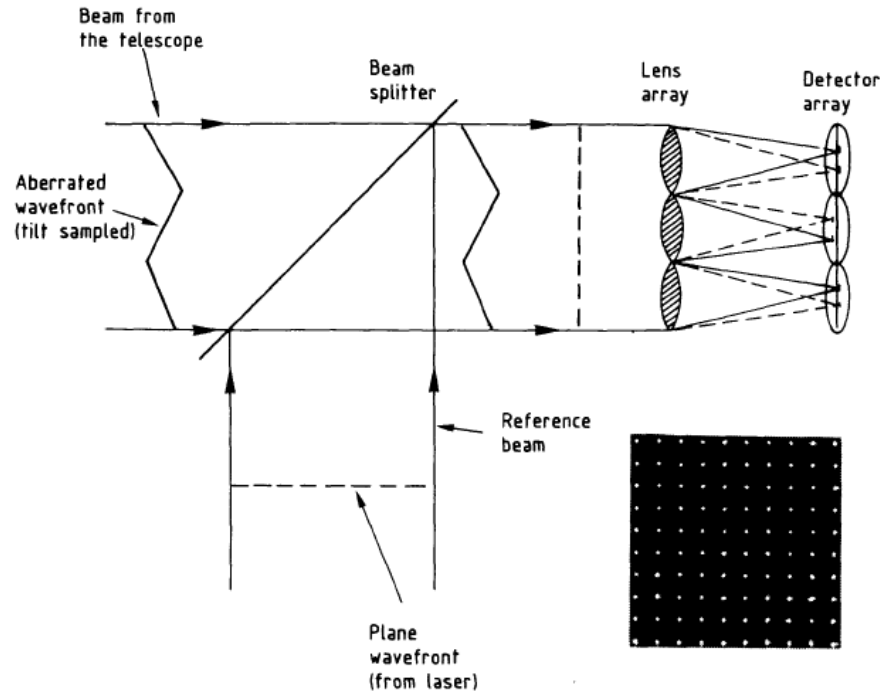
Est ASO, un moyen de contrôle optique possédant plusieurs qualités parmi celles-ci :

- une capacité temps réel
- une exactitude adaptée à une mission
- un emploi « pratique »
- une efficacité radiométrique
- un achromatisme
- une absence de bras de référence
- ...

# Rédaction de la thèse

- Etat de l'art des techniques d'Analyse de Surface d'Onde
  - Un découpage possible
    - Les techniques qui mesurent directement la phase
    - Celles qui mesurent le gradient (ou plutôt sa/ses projection(s))
    - Celles qui mesurent la courbure
  - Les mesures de gradient : seules opérationnelles à l'époque pour l'analyse temps réel (mais le senseur de courbure commence à pointer son nez)
    - les méthodes géométriques VS les méthodes interférométriques

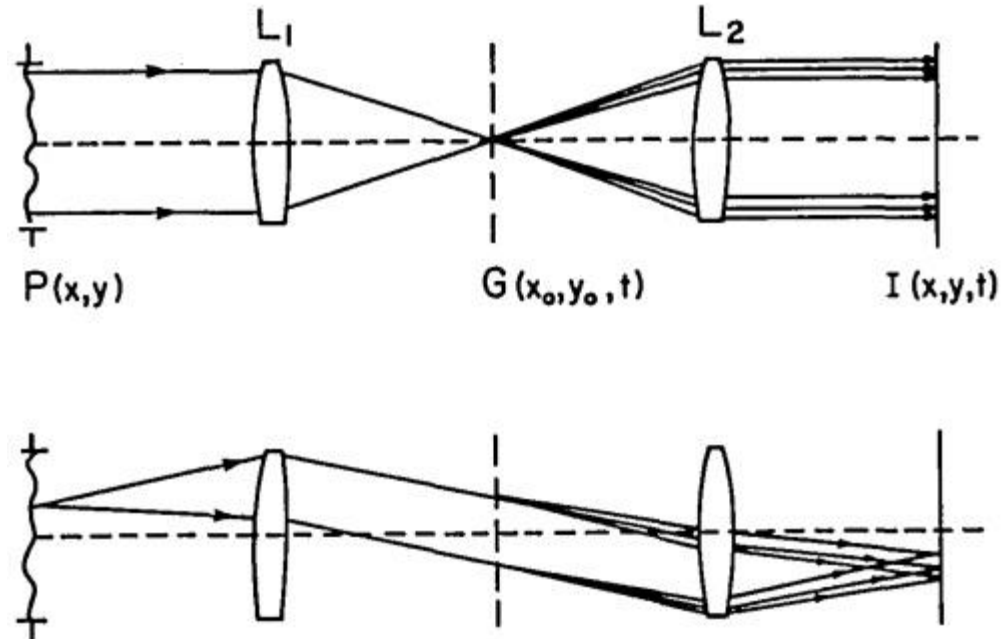
# Le géométrie, Shack-Hartmann



Fritz Merkle, ESO, 1987

# L'interférométrie

- Lateral shearing interferometer (Ronchi > Itek, Wyant, Koliopoulos, Hardy)



$$I(x,y,t) = \left| \text{F.T.} \{ G(x_0, y_0, t) \} ** P(x,y) \right|^2$$



# Les concurrents dans la course à l'optique adaptative

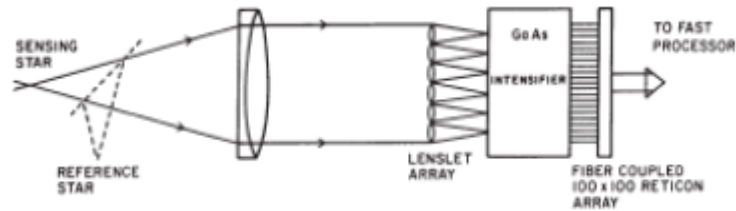
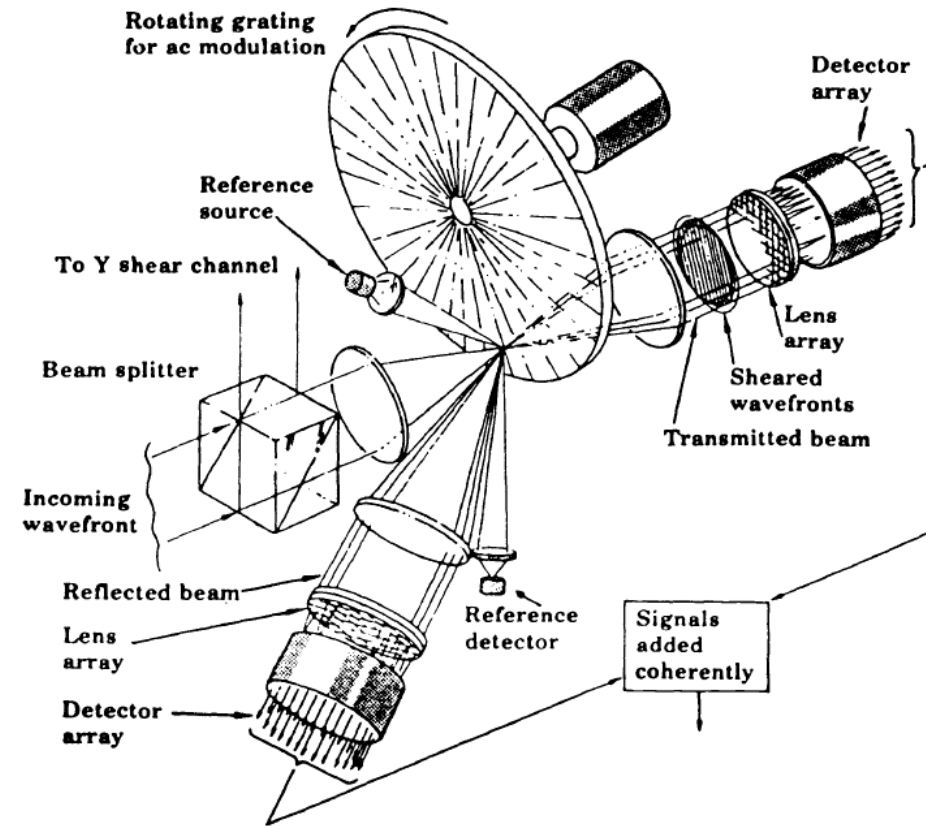


Figure 12: Properties of NOAO Wavefront Sensor.

Robinson, L. B. (Ed.). (2012). *Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy: Present and Future The Ninth Santa Cruz Summer Workshop in Astronomy and Astrophysics, July 13–July 24, 1987, Lick Observatory*. Springer Science & Business Media.

Calcul temps réel des barycentres



Modulation temporelle

# Comparaison dans le cadre de l'état de l'art

- Très éloignés pour la description, tant au niveau procédé (géométrique vs interférométrique) qu'au niveau dispositif
- Pourtant :
  - Ils mesurent la même quantité,
  - ont les mêmes propriétés d'achromatisme,
  - ont les mêmes limites théoriques...

Curieux, ça...



# Un article dans l'air du temps...

- Roddier, François J. "Variations on a Hartmann theme." *Optical Engineering* 29.10 (1990): 1239-1242.

*"The lenslet array of a Shack-Hartmann sensor is nothing more than a crossed grating optimized to concentrate the light in small spots in the observation plane"*

*Publié Octobre 1990*

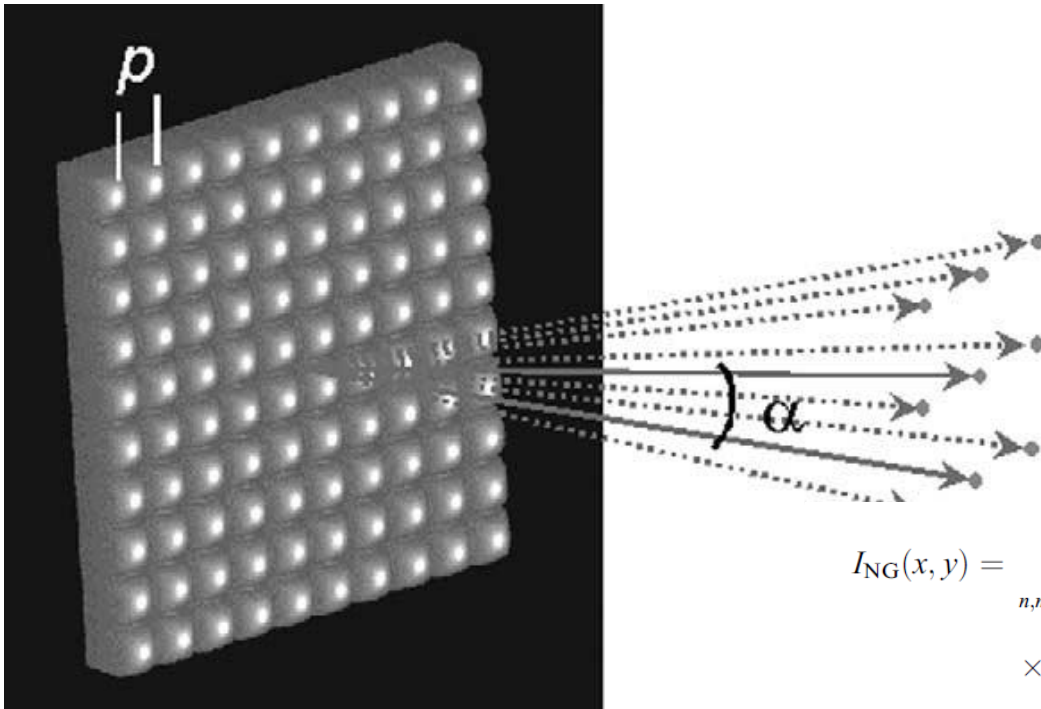
*Invited Paper AC-i 12 received Feb. 10, 1990; revised manuscript received June 8, 1990; accepted for publication July 17, 1990. This paper is a revision of Paper i237—70, presented at the SPIE conference Amplitude and Intensity Spatial Interferometry, Feb. i4—i6, 1990, Tucson, Ariz. The paper presented there appears (unrefereed) in SPIE Proceedings Vol. 1237.*

Ils se ressemblent parce que  
les deux appartiennent à la même famille,



# Le Shack-Hartmann vu comme un lateral shearing interferometer

- Finalement publié en 2003, Primot, Jérôme. "Theoretical description of Shack–Hartmann wave-front sensor." *Optics Communications* 222.1-6 (2003): 81-92, puis en 2021 : Rouzé, Bastien, et al. "Extracting more than two orthogonal derivatives from a Shack-Hartmann wavefront sensor." *Optics Express* 29.4 (2021): 5193-5204..



## So What ?

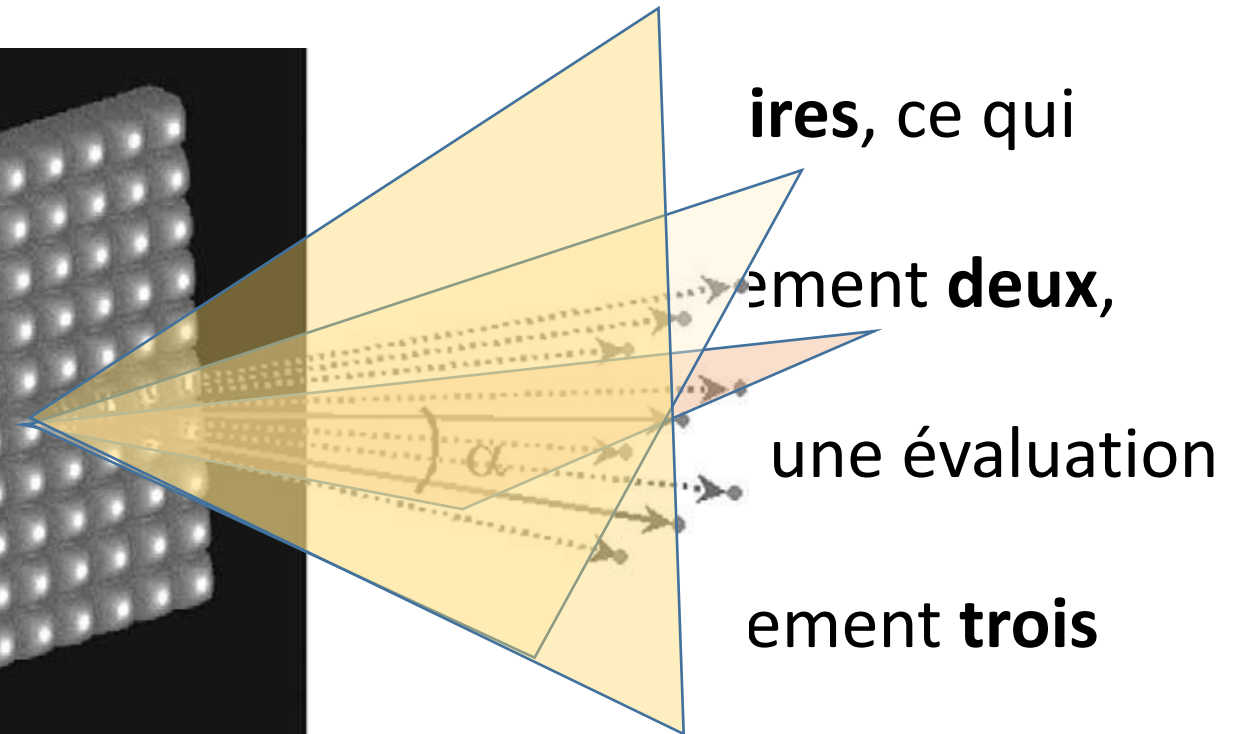
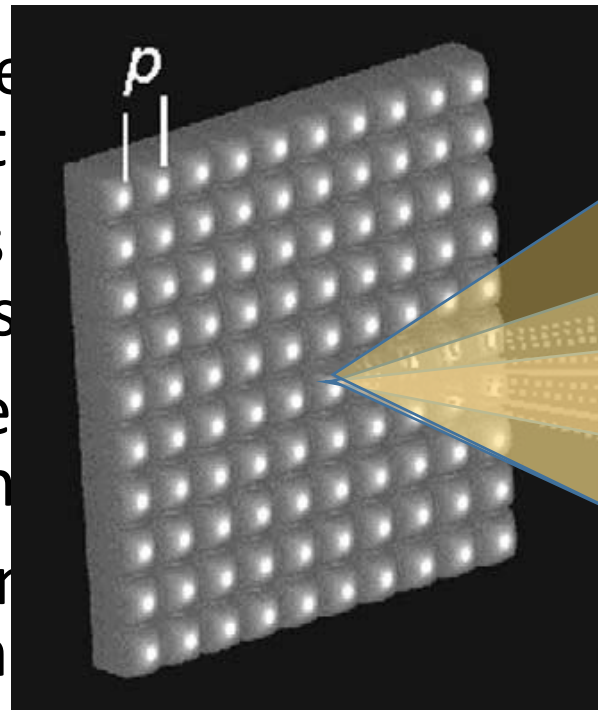
$$I_{\text{NG}}(x, y) = \sum_{n, m = -H_{\text{NG}}}^{H_{\text{NG}}} \sum_{n', m' = -H_{\text{NG}}}^{H_{\text{NG}}} \gamma_{n, m} \gamma_{n', m'}^* \exp \left( i \left( \Phi \left( x + \frac{np}{2H}, y + \frac{mp}{2H} \right) - \Phi \left( x + \frac{n'p}{2H}, y + \frac{m'p}{2H} \right) \right) \right) \times \exp \left( \frac{2i\pi}{p} \left( (n - n')x + (m - m')y \right) \right) \quad (31)$$

with

$$\gamma_{n, m} = \Psi_{\mu l} \left( \frac{n}{p}, \frac{m}{p} \right) \exp \left( \frac{-i\pi}{2H} (n^2 + m^2) \right), \quad \dots$$

# La bonne idée...

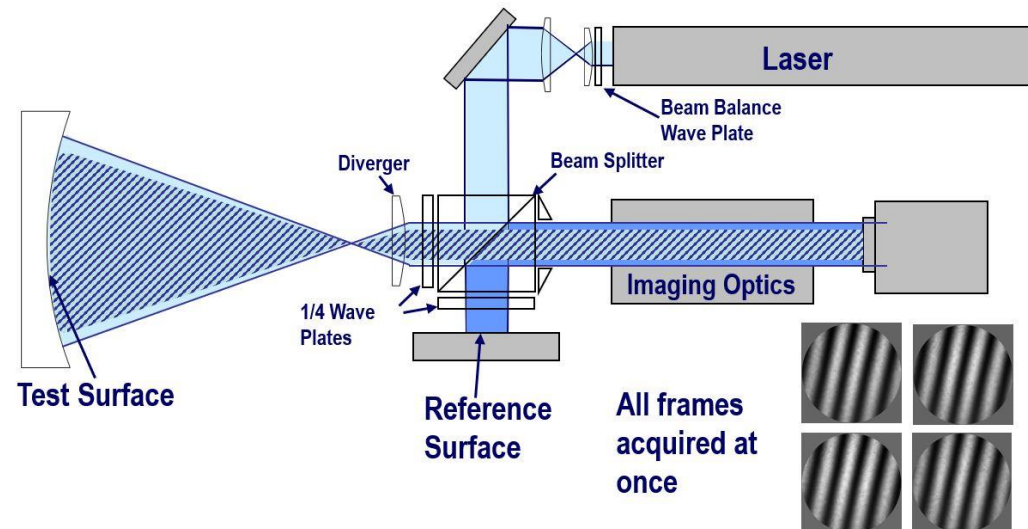
- Le Shack-Hartmann produit **N par N** répliques basculées, avec N de l'ordre d'une vingtaine
- Ces répliques ont de **petites** dimensions, ce qui permet une évaluation **simple**
- Les interféromètres **traditionnels** utilisent **deux** voire **trois** répliques
- Les vecteurs directs du gradient dans un **plan**
- Quid d'un interféromètre **à** **trois** répliques, mais **non**



1990

# ...mais la mauvaise direction

- Le système classique pour produire deux répliques, c'est le Michelson
- Une solution « simple » : créer un Michelson à trois bras...
- Positionnement : faire du contrôle optique, dans la lignée des Michelson, Twyman-Green ou Fizeau, golden standards du domaine

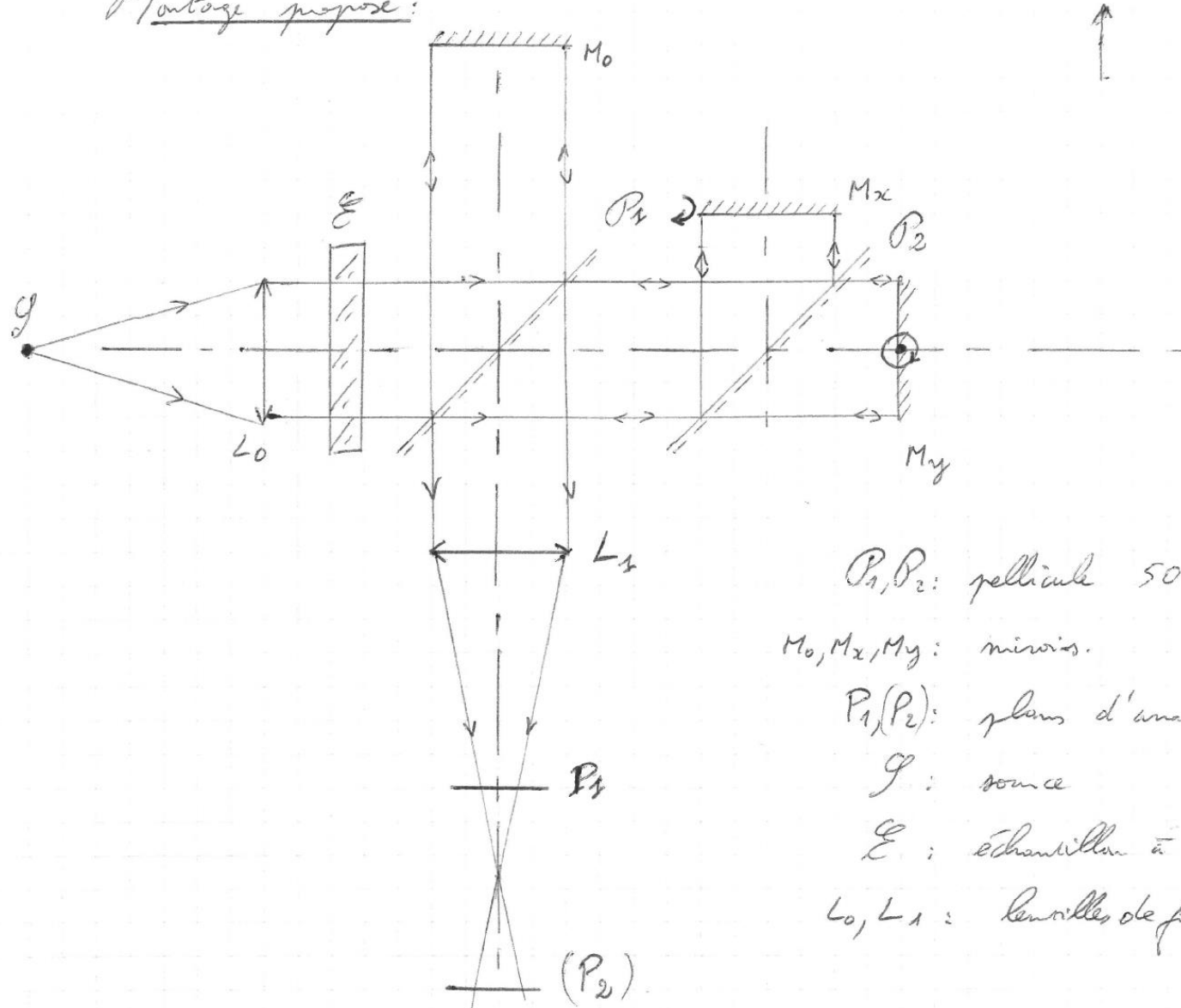


# Des propriétés remarquables !

- Les franges sont sinusoïdales dans les directions principales : solution optimale pour l'échantillonnage (mais 9 pixels par point au lieu de 4)
- Il y a une relation de clôture pour les trois directions qui permet une estimation de l'erreur à partir de la mesure elle-même
- Il y a une invariance par propagation, qui permet un réglage continu de la sensibilité
- La technique est auto-référente (suppression du miroir étalon)
- Objectif > concevoir un moyen de contrôle optique concurrent des ZYGO, WYKO, ...



Montage proposé:



- $P_1, P_2$ : pellicule 50%
- $M_0, M_x, M_y$ : miroirs.
- $P_1, P_2$ : plans d'analyse.
- $g$ : source
- $E$ : échantillon à analyser.
- $L_0, L_1$ : lentilles de focale  $f_0, f_1$

# Comment diviser simplement en trois ?

- Jean Surget (holographie)

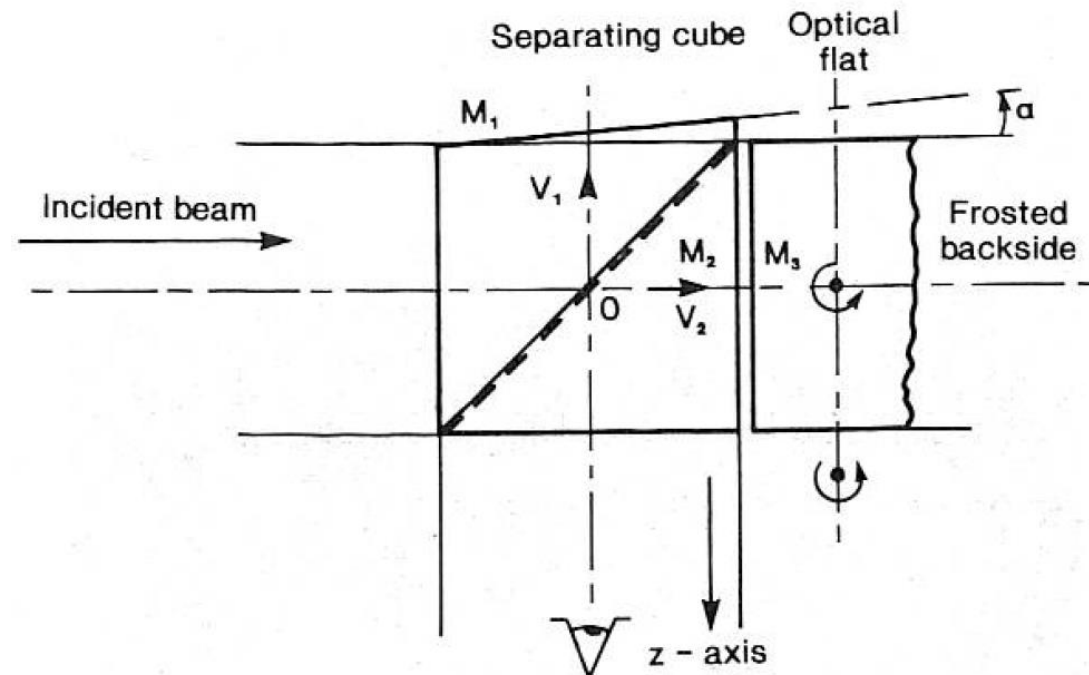
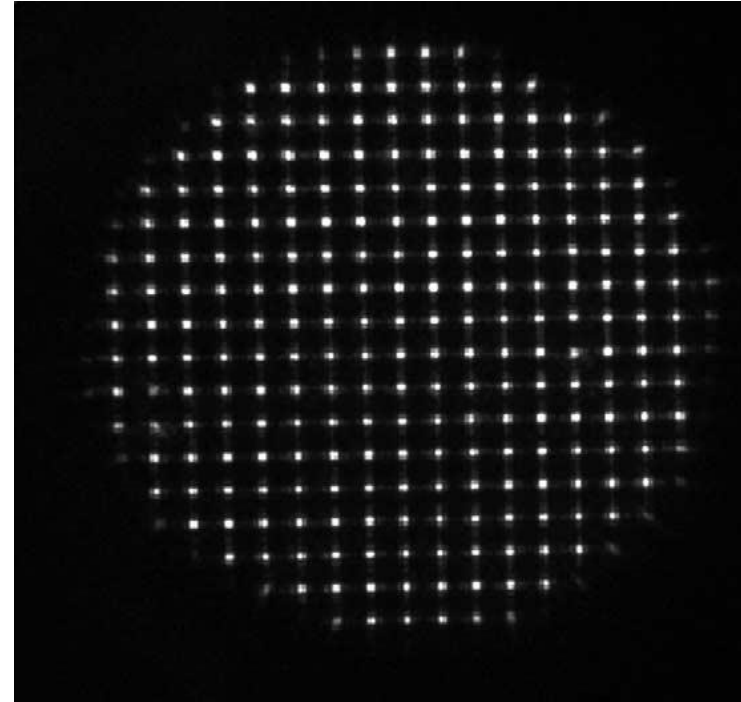
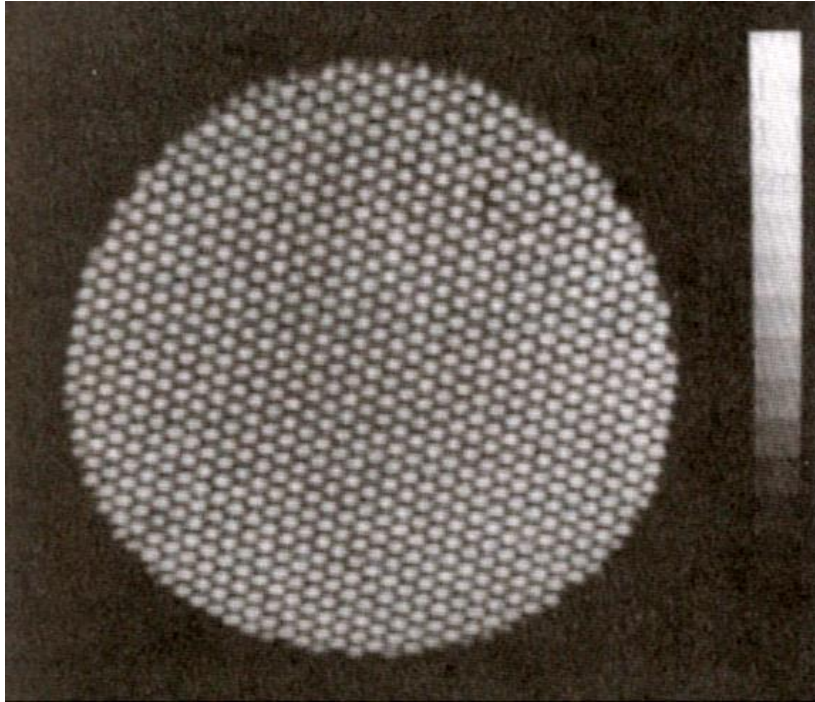


Fig. 5. Description of the replication device.

Après optimisation des traitements, on peut obtenir un rdt lumineux de l'ordre de 30%, avec 3 voies parfaitement équilibrées

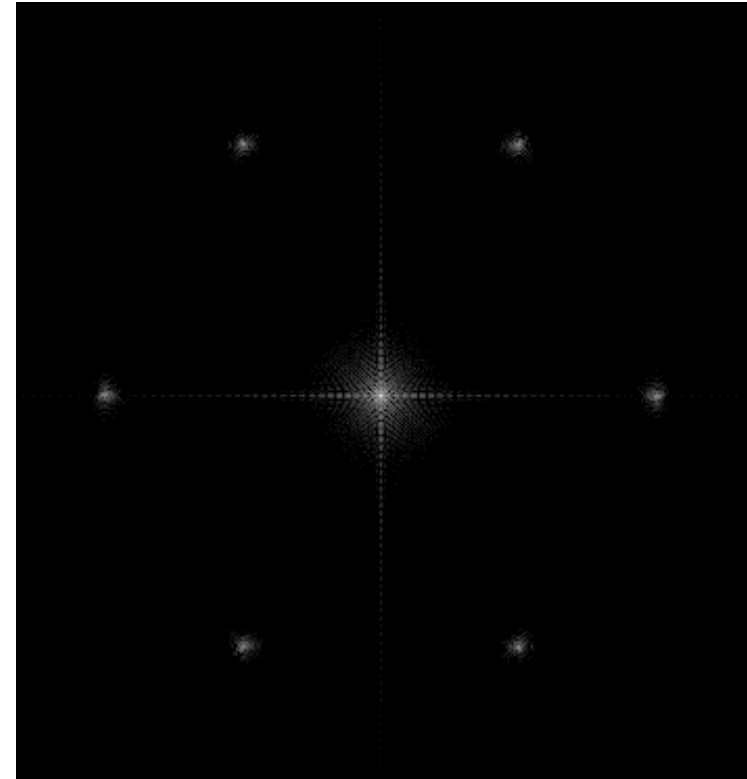
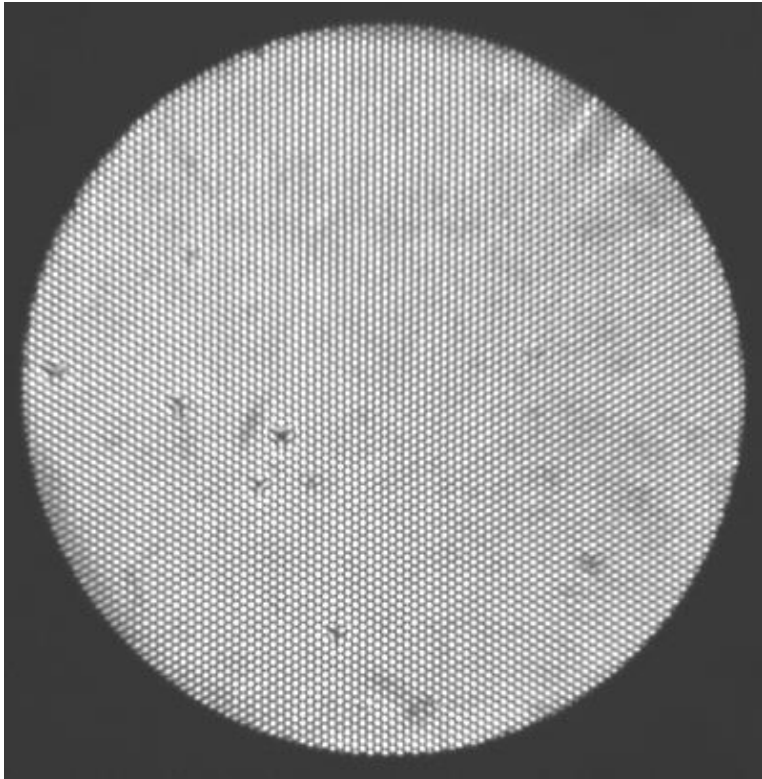
# Un caractère naturellement Haute Résolution spatiale...



Typiquement, plus de 4 fois plus de points de phase pour un même détecteur

# Adapté au traitement de Fourier

- *M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am. 72, 156–160 (1982).*





HP 3000 DIGITAL TAPE UNIT  
1800 CPI HEAD AFTER WRITE

STOP  
REWIND  
EJECT  
PAUSE

POWER RETURN

0  
1  
2  
3  
OFF



HP 3000 SERIES III

CURRENT INSTRUCTION REGISTER

SYSTEM STATUS REGISTER

SYSTEM ON

SYSTEM OFF

7970B

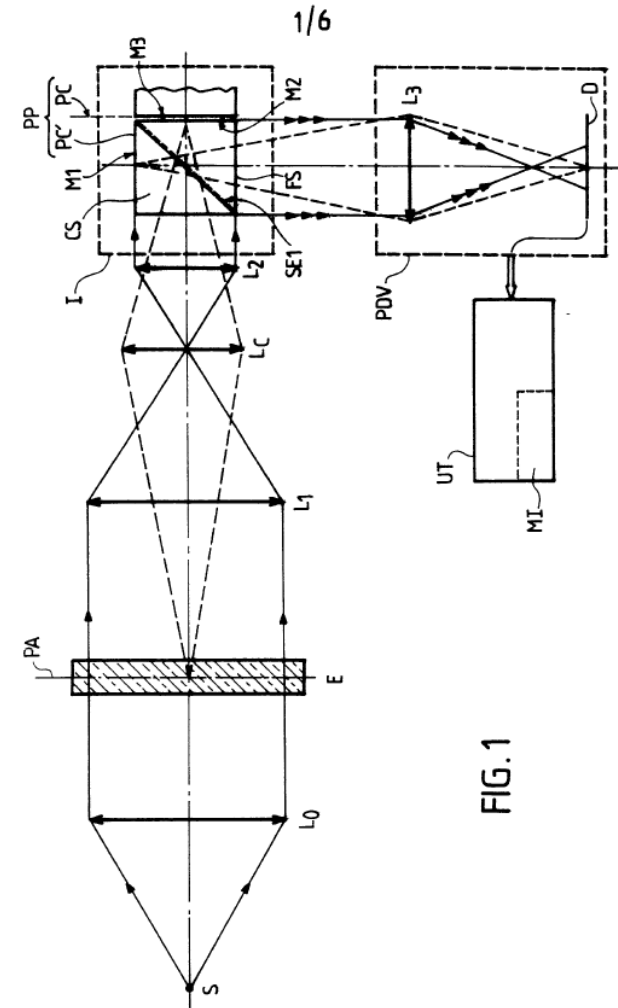
# L'étape brevet...



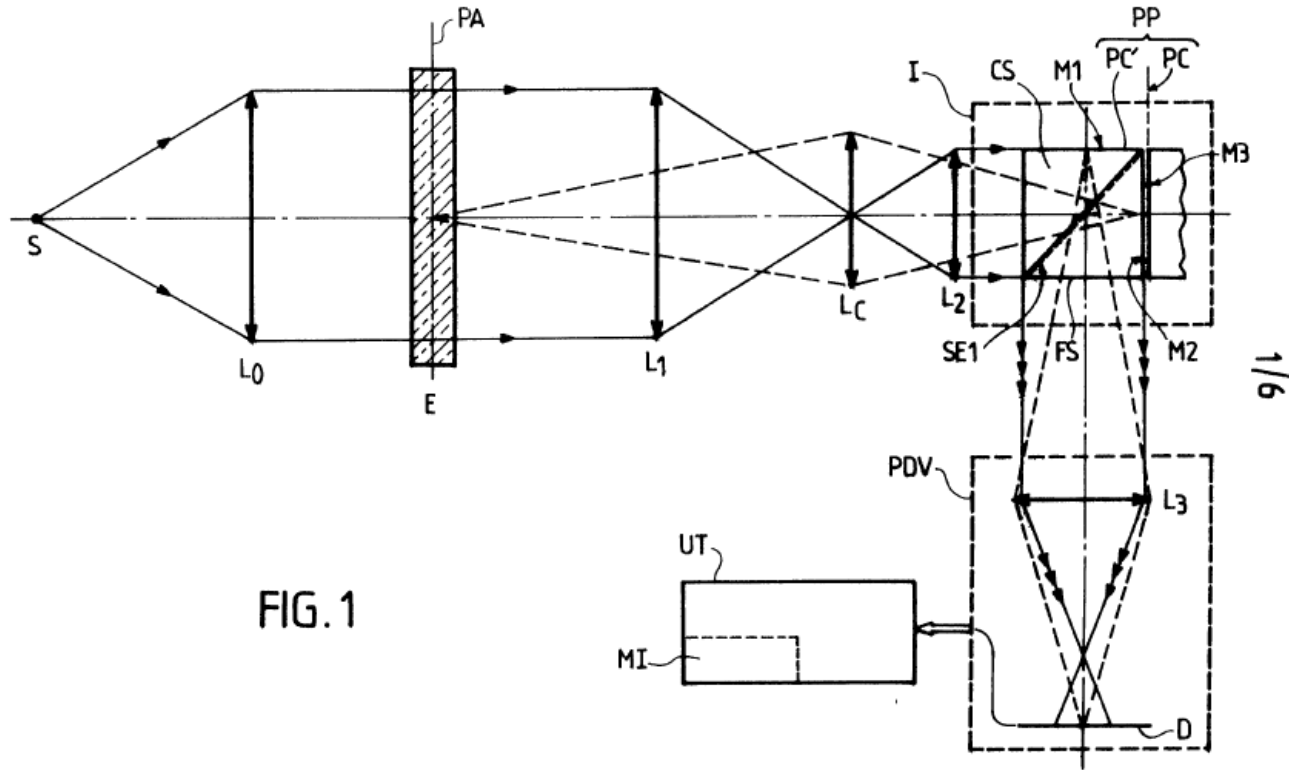
# La mère de tous les idml...

Abrégé 18-10-1991 :

Un système optique propre à recevoir un faisceau de lumière monochromatique définit, sur le trajet dudit faisceau, au moins deux zones optiquement conjuguées l'une de l'autre, l'une dite plan d'analyse (PA), et l'autre dite plan de partition (PP). Trois dioptries principaux (M1, M2, M3), au moins partiellement réfléchissants, situés au voisinage du plan de partition, ou d'une image de celui-ci renvoient **trois faisceaux d'axes non colinéaires, qui interfèrent**. On y ajoute des moyens d'observation (PDV) de l'image interférométrique, existant dans au moins une zone dite plan d'observation, voisine d'un plan de référence confondu avec le plan de partition (PP) ou conjugué de celui-ci. Cette observation montre des figures d'interférences qui contiennent des informations sur les défauts de phase du faisceau à analyser.

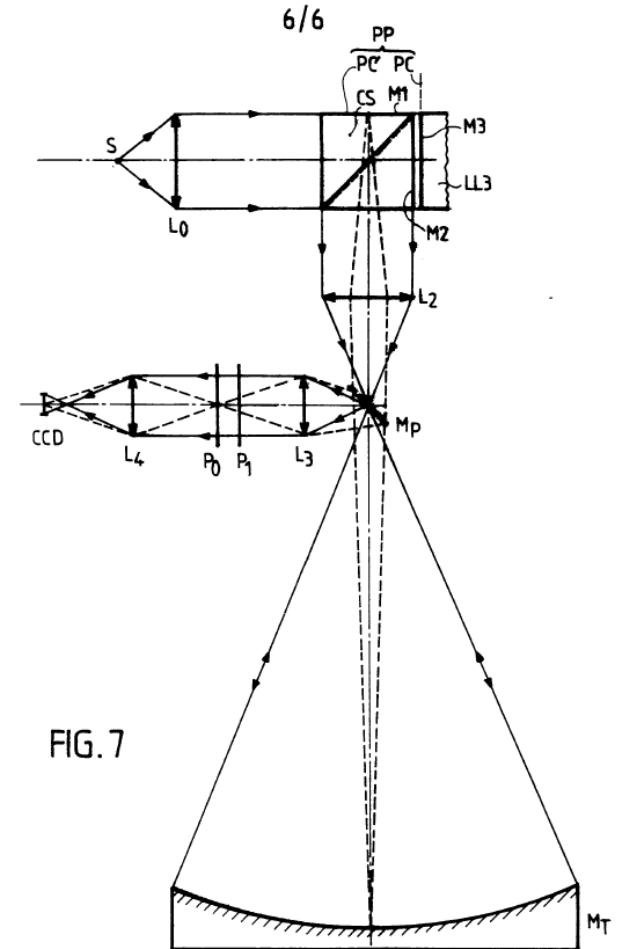


# Le brevet vu comme méthode d'analyse scientifique



1/6

2682761



M<sub>T</sub>



# TWLSI, un succès d'estime

- Contact SESO pour lancer une valorisation, via un financement DGA, ...
- Obtention d'un budget pour des mesures optiques particulières (optiques usinage diamant, excentrées, ...)



July 1992, SPIE San Diego : une rencontre ...

Chris Koliopoulos (fondateur WyKo, avec Wyant, 1982)

Obtention d'une bourse de thèse (L. Sogno)

# Le retour d'é

- TWLSI : technique
- Mais il est Impossible sur ce thème
- Une demande systématique
  - Si résultat différent de la notoriété, donc es
  - Si résultat identique
- Une question agaçante
  - Est-ce que ça existe



ptique

veloppement sur ce

Go

ur du fait de sa

oyen autre ?

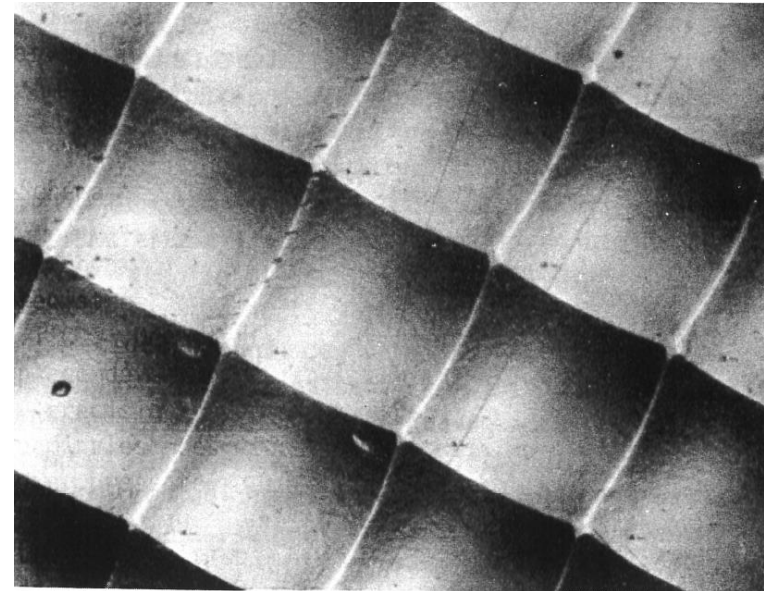
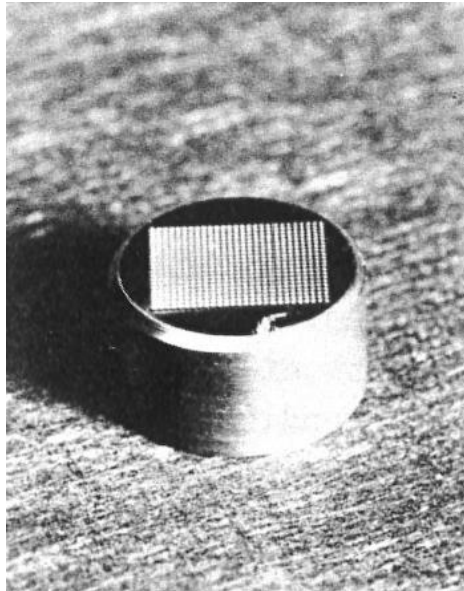
# La redirection, revenir à l'Analyse de Surface d'Onde

- Une propriété manquante : l'achromatisme
  - Deux raisons :
    - Achromatisme permet de travailler en large bande (rendement lumineux)
    - Achromatisme permet de ne pas dérégler quand on change de longueur d'onde
- **En fait, c'est une propriété perdue !**
- L'achromatisme des Lateral Shearing Interferometer et du Shack-Hartmann vient du fait que les répliques sont produites par un réseau

*Ronchi, V. (1964). Forty years of history of a grating interferometer. Applied optics, 3(4), 437-451.*

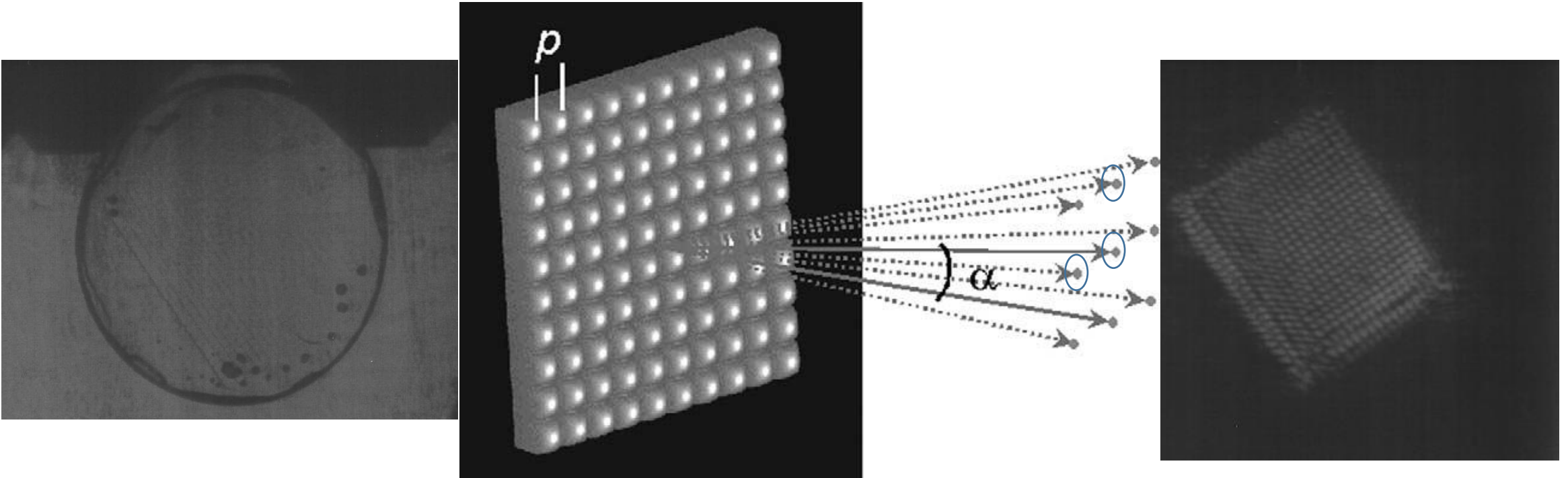
# Repartir d'une grille de microlentilles...

- Fabrication Onera (M. Billard), mais en maillage cartésien...



Moule en laiton, matricé avec une bille

# Les premières franges trois ondes achromatiques



Expérience réalisée vers Mai 1993

# Le deuxième brevet...

⑤7 Dans l'interféromètre proposé, une optique d'entrée définit un plan de référence ( $P_C$ ), optiquement conjugué du plan dans lequel est analysée la surface d'onde d'un faisceau de lumière.

Un réseau maillé bi-dimensionnel (GR) est placé dans ce plan de référence ( $P_C$ ), perpendiculairement au faisceau. Les différents sous-faisceaux, dûs aux différents ordres de diffraction, sont focalisés conjointement par une première optique ( $L_1$ ) en un plan focal intermédiaire ( $P_F$ ), au voisinage duquel un masque ( $M$ ) sélectionne parmi les sous-faisceaux, ceux qui relèvent d'au moins trois ordres de diffraction distincts. Une seconde optique ( $L_2$ ) amène les sous-faisceaux sélectionnés à un plan ( $P_O$ ), dit de sensibilité nulle, conjugué du plan du réseau.

L'image d'interférence est observée dans un plan de travail ( $P_A$ ), situé à distance choisie ( $d$ ) du plan de sensibilité nulle.

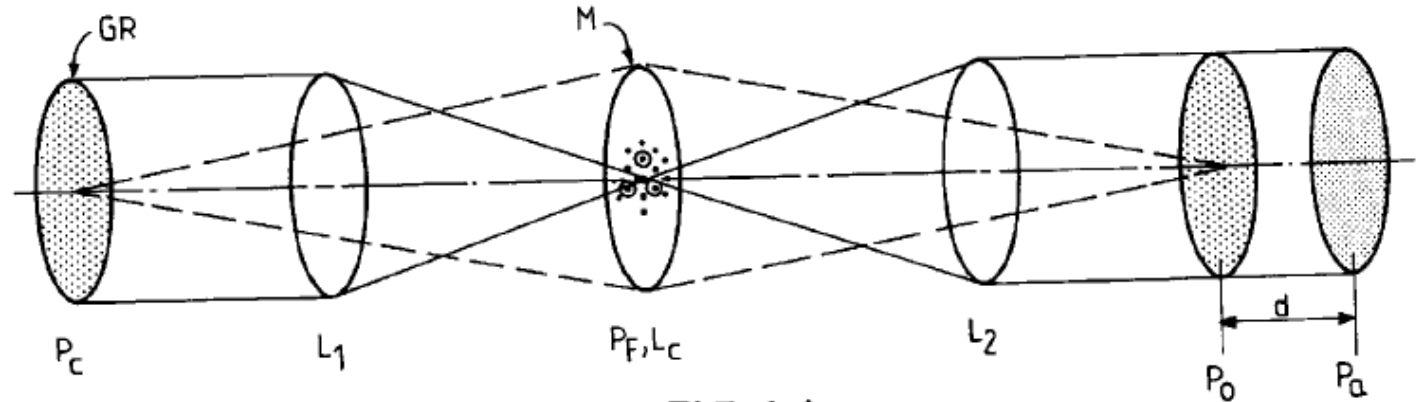


FIG. 1 A

# L'émancipation, ...

- Autour des années 1995-1999
- Participation de Télécom Bretagne pour la techno
  - De Bougrenet, Fracasso, Heggarty
- Les lasers ultra-intenses
  - J Ch Chanteloup, Fred Druon, Queneuille, Mourou, Paurisse, Vdovin, Faure, Maksimchuk, Baldis, Migus, Huignard ... : LULI, CUOS Michigan, Institut d'Optique, Delft, Thomson, ...
  - Mais aussi : Trinita Troisk Institute, Nugumanov, Sokolov
  - Et la Chine ... Hong Wei, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

... Et un nouveau retour d'expérience ...

- J Ch Chanteloup pense à lancer une valo, mais lui reste une réserve...

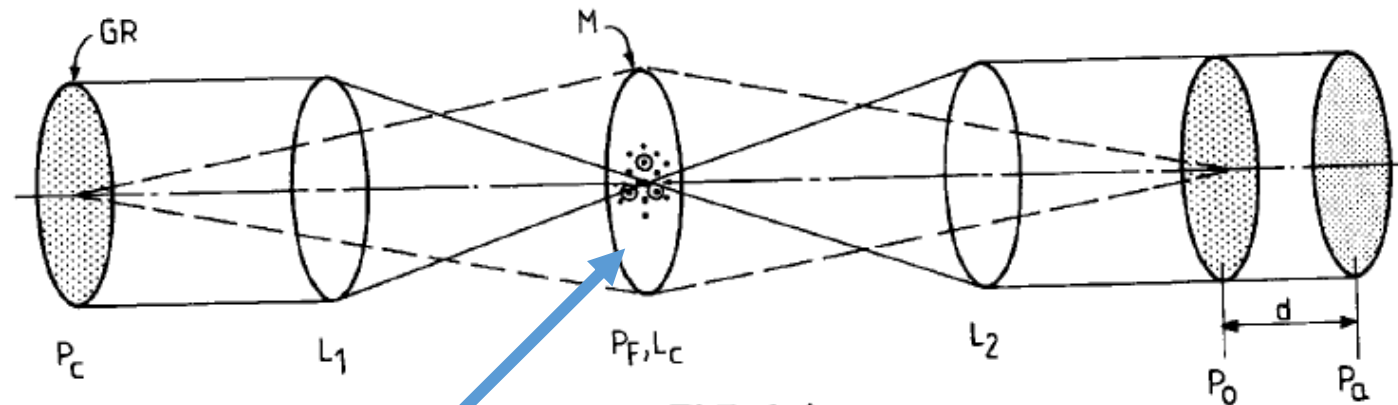


FIG. 1 A

Les trous de filtrage ! Pièce pénible à régler





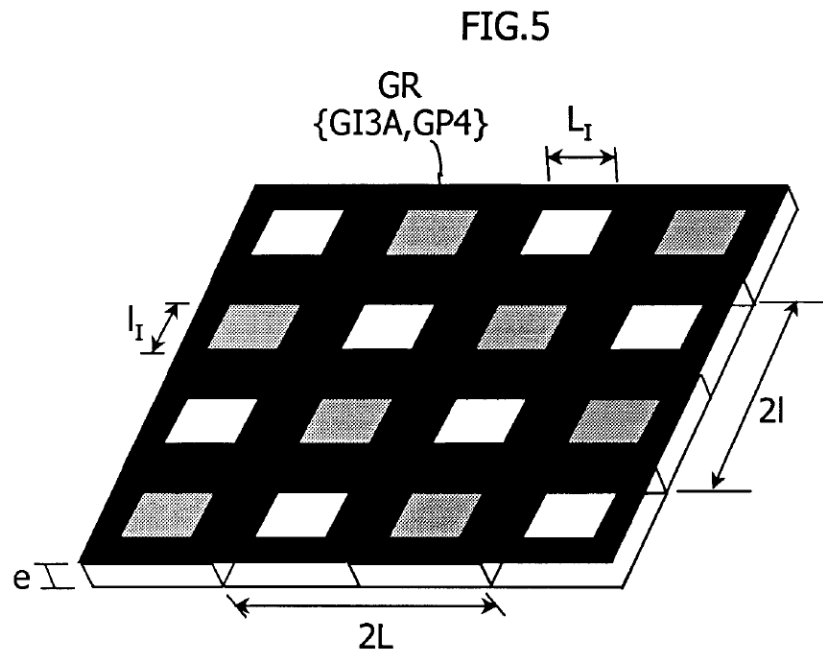
# ... une solution déjà anticipée !

## (54) Interféromètre optique achromatique, du type à sensibilité continûment réglable

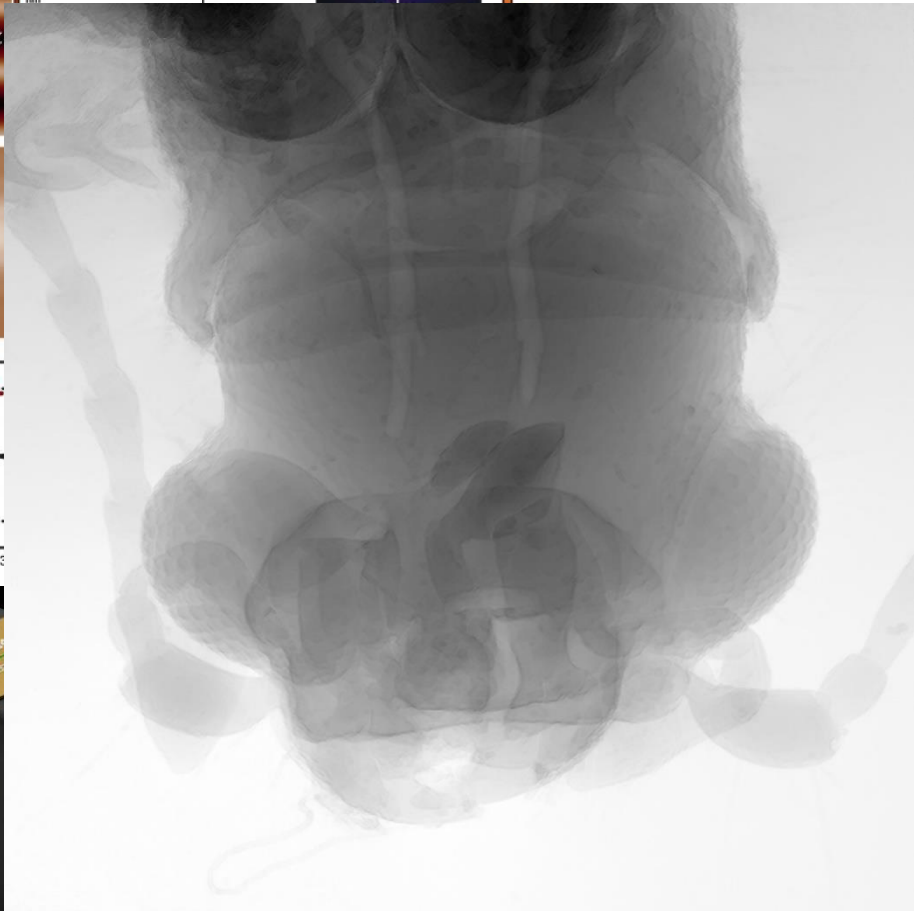
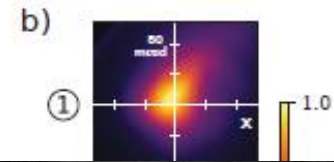
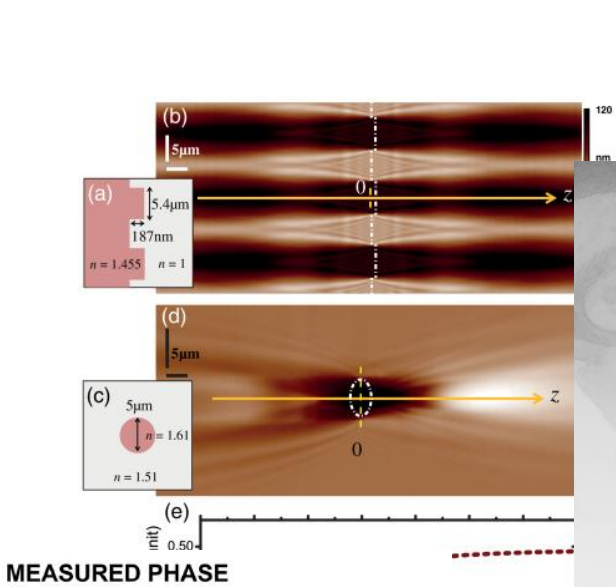
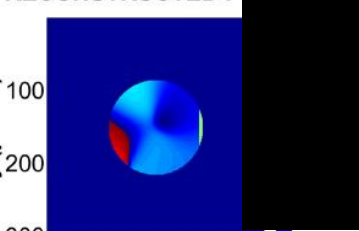
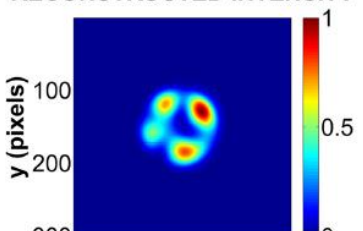
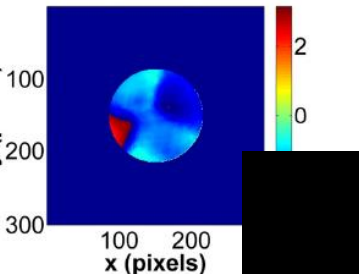
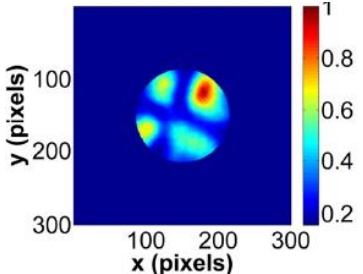
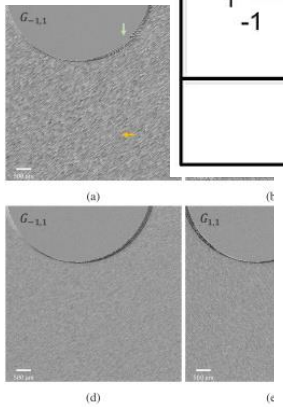
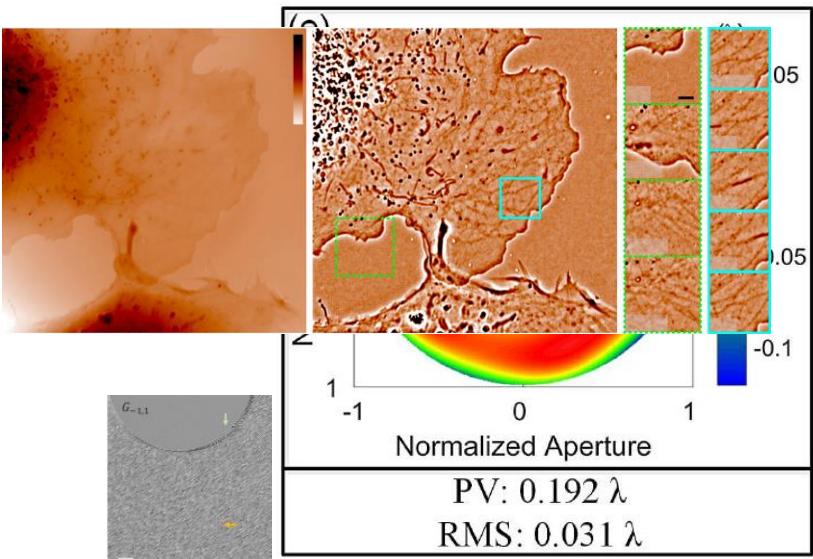
(57) Procédé pour l'analyse de surface d'onde d'un faisceau de lumière, dans lequel on place un réseau de diffraction à maillage rectangulaire dans un plan perpendiculaire au faisceau de lumière à analyser et optiquement conjugué du plan d'analyse. Différents faisceaux émergents du réseau interfèrent en formant une image dont les déformations sont liées aux gradients de la surface d'onde analysée. Le procédé est caractérisé en ce que le réseau (GR)

réalise la multiplication d'une fonction d'intensité, réalisée par un réseau (GI3A), qui définit un maillage rectangulaire de sous-pupilles transmettant la lumière du faisceau à analyser en plusieurs faisceaux émergents disposés suivant un maillage rectangulaire avec une fonction de phase, réalisée par un réseau (GP4) qui introduit, entre deux faisceaux émergents adjacents, un déphasage tel que ces deux faisceaux émergents soient en opposition de phase.

Primot, Guérineau, EP1061349



# Et là, commence **votre** aventure avec l'IDML...



# MERCI !!!

