



Journées thématiques: « Défauts dans les cristaux »



« Qualification de cristaux laser et méthodes de caractérisation des défauts »

Les 2 et 3 Septembre 2021 à Lyon

Gurvan BRASSE

*CIMAP, Centre de recherches sur les Ions, les MATériaux et la Photonique
UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN-Université de Caen*



Plan de l'exposé

- **Contexte et problématique**
- **Méthodes de caractérisation usuelles des défauts**
- **L'ombroscopie**
- **La strioscopie**
- **Analyse quantitative de la qualité optique des cristaux**
- **Conclusion**



Contexte & Motivations

➔ Challenge international pour le développement de lasers de puissance

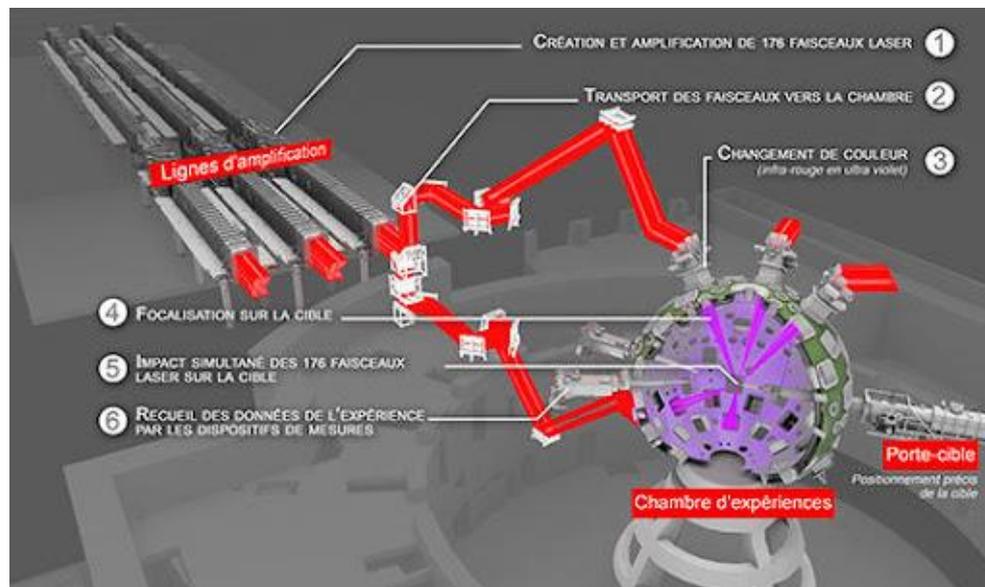
Laser Méga-Joule (LMJ) et PETAL (PW) au CEA CESTA

Impulsions laser ultra-courtes et de hautes énergie



➤ Milieu à gain actuellement utilisé: Verres de phosphates dopés Nd^{3+} : LHG-8 (Hoya) et LG-770 (Schott)

➤ **Objectif:** Les substituer par des cristaux ayant de **meilleures propriétés thermo-mécaniques** et des **propriétés spectroscopiques optimisées**.



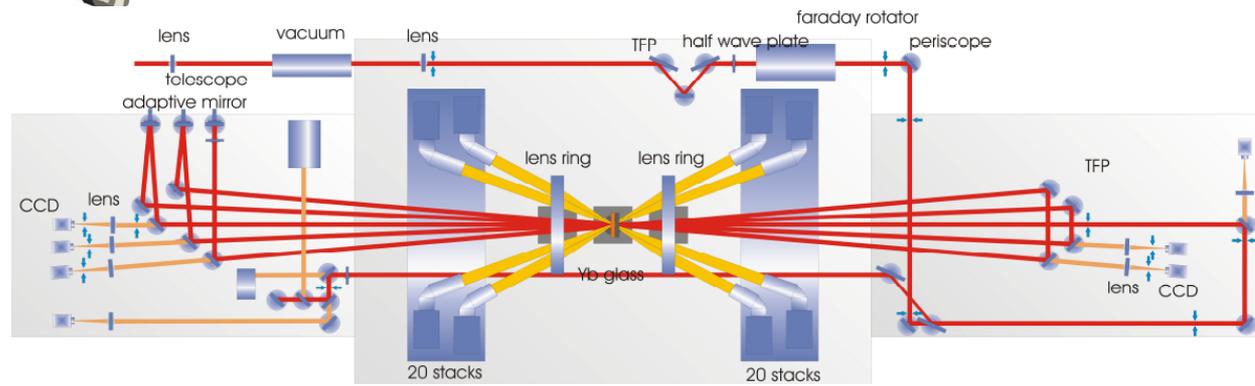
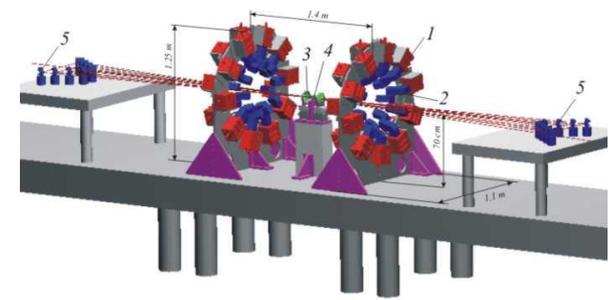
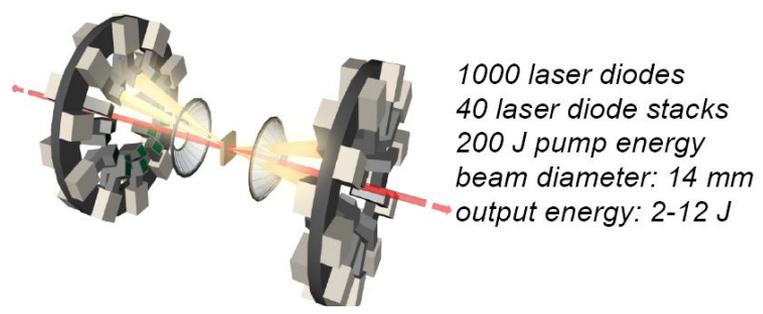
➤ *Présentation de Cédric Maunier (CEA-CESTA)*



Contexte & Motivations

➔ Challenge international pour le développement de lasers de puissance

POLARIS: Oscillateur $\text{Yb}^{3+}:\text{KGW}$ pompé diode + Amplificateurs à verres phosphate dopés Yb^{3+}



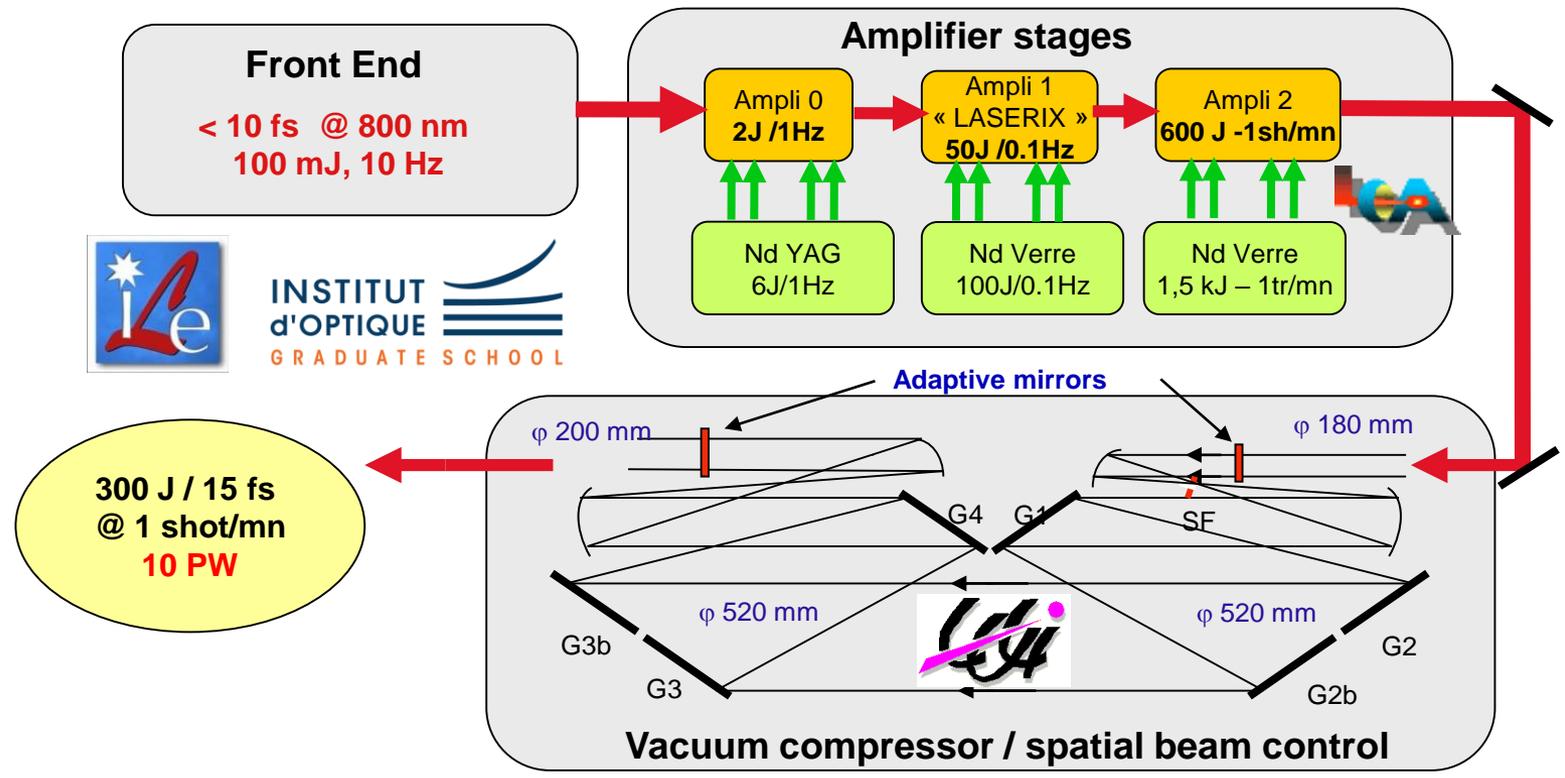
Objectif : accroître le taux de répétition avec des amplificateurs $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Yb}:\text{CaF}_2$



Contexte & Motivations

➔ Challenge international pour le développement de lasers de puissance

ILE-APOLLON 10P : Schéma général



Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique

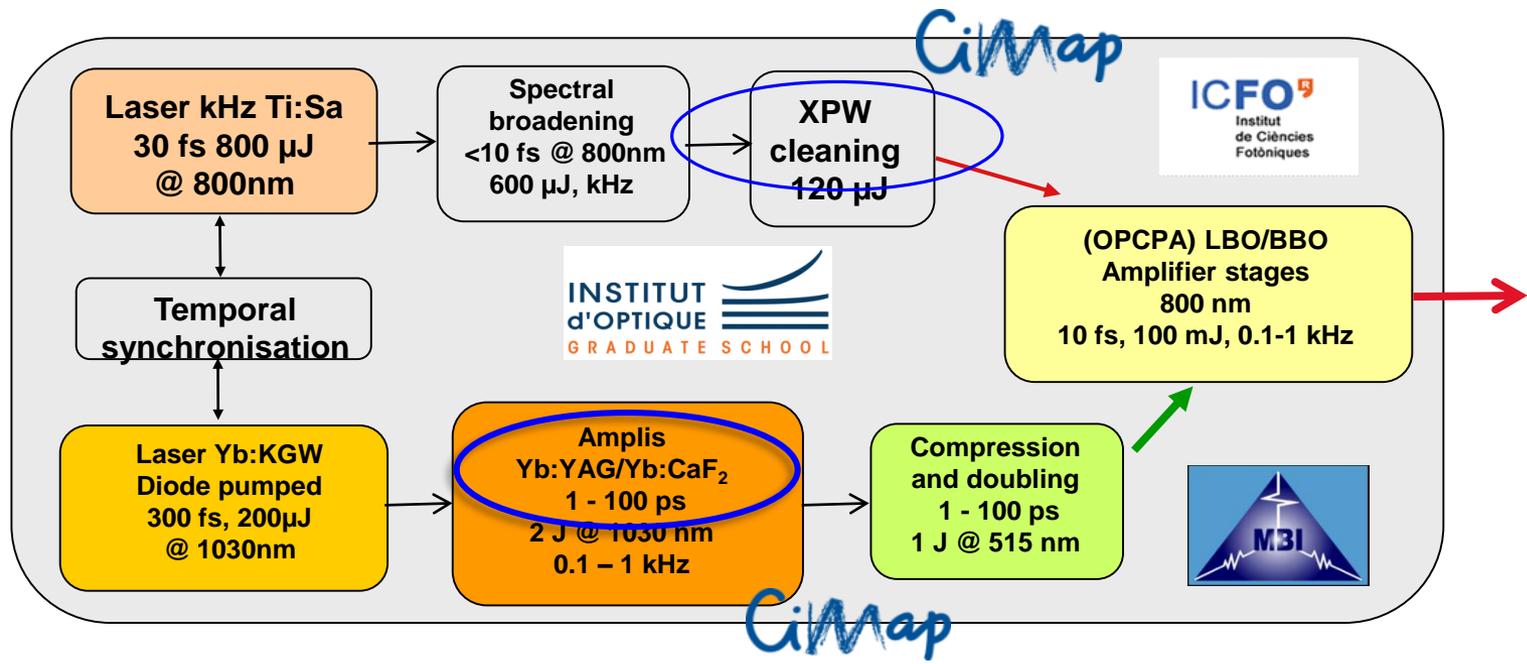
Brasse Gurvan



Contexte & Motivations

➔ Challenge international pour le développement de lasers de puissance

ILE-APOLLON 10P : Front End



Objectif : fournir des impulsions ultra courtes (100 mJ) avec le plus haut taux de répétition possible

Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique

Brasse Gurvan

Contexte & Motivations

Puissance laser très élevées ➡ **Conditions extrêmes pour les cristaux**

Influence critique des défauts sur les performances laser:

- ➡ Impératif de contrôler et caractériser ces défauts rigoureusement;
- ➡ Mieux comprendre la cause et l'origine de ces défauts pour les éliminer;
- ➡ Impératif de définir des critères quantitatifs fiables pour sélectionner les cristaux et assurer une certaine reproductibilité des performances laser;
- ➡ Mieux comprendre le rôle de ces défauts sur les propriétés optiques et les mécanismes d'endommagement;

Contexte & Motivations

Types de défauts rencontrés:

- ➔ Défauts de surface liés à la préparation/au polissage;
- ➔ Inclusions, bulles, impuretés chimiques, centres colorés;
- ➔ Variations locales de l'indice de réfraction, macles;
- ➔ Contraintes internes;
- ➔ Défaut d'orientation cristalline – défaut lié à la préparation;

Défauts
dans le
volume



Contexte & Motivations

Types de défauts rencontrés:

- ➔ Défauts de surface liés à la préparation/au polissage;
- ➔ Inclusions, bulles, impuretés chimiques, centres colorés;
- ➔ Variations locales de l'indice de réfraction, macles;
- ➔ Contraintes internes;
- ➔ Défaut d'orientation cristalline – défaut lié à la préparation;

} Défauts
dans le
volume

Les conséquences de ces défauts:

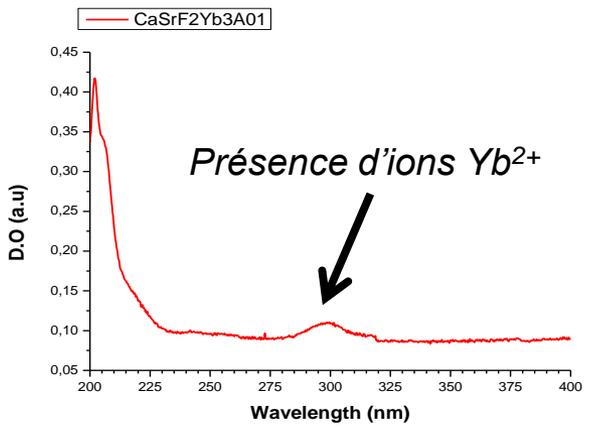
- ➔ Endommagement / destruction du cristal;
- ➔ Dépolarisation du faisceau;
- ➔ Déformation du front d'onde;
- ➔ Pertes optiques;
- ➔ Echauffement anormal / biréfringence thermique (cristaux cubiques);



Méthodes de caractérisations usuelles mises en oeuvre

Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ La spectroscopie d'absorption UV-Vis



Signature spectroscopique (en absorption) de nombreux centres colorés ou impuretés dans le domaine UV-Vis

➔ Détermination de la concentration en ions $[Yb^{2+}]$ dans $CaF_2:Yb^{3+}$ par exemple;

“Additive colouring of $CaF_2:Yb$ crystals: Determination of Yb^{2+} concentration in $CaF_2:Yb$ crystals and ceramics”, (prochainement publié dans Applied Physics B) A.S. Shcheulin, A.E. Angervaks, T.S. Semenova, L.F. Koryakina, M.A. Petrova, P.P. Fedorov, V.M. Reiterov, E.A. Garibin, A.I. Ryskin

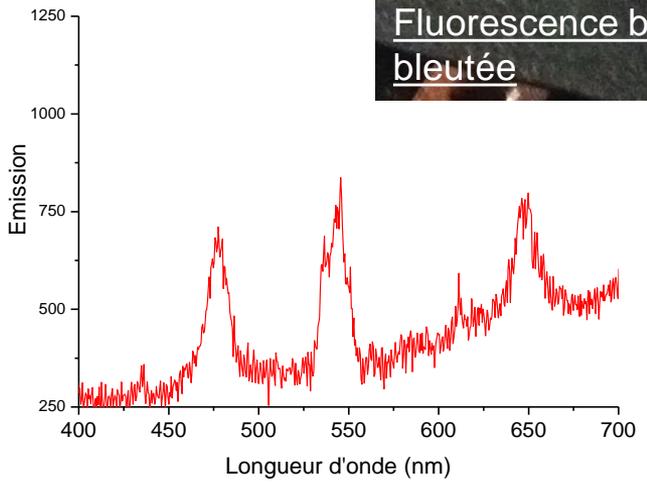


Spectrophotomètre Perkin-Elmer (Transmission / Réflexion / Sphère intégrante)

Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

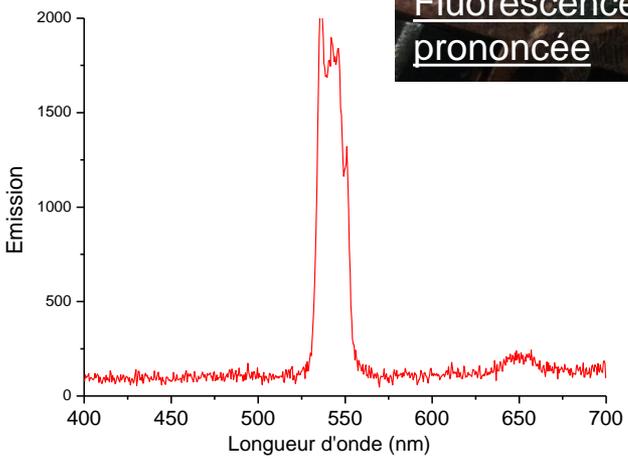
➔ Fluorescence UV-Vis pour la mise en évidence d'impuretés chimiques

CaF₂:5%Yb³⁺
 $\lambda_{exc} = 800 \text{ nm}$



- Pureté de YbF₃:4N
 - Tm³⁺ > 1ppm
- ➔ Signature des ions Tm³⁺:

CaF₂:5%Yb³⁺
 $\lambda_{exc} = 800 \text{ nm}$



- Pureté de YbF₃: 4N;
 - Er³⁺ < 1 ppm, Tm³⁺ = 1 ppm
- ➔ Signature lumineuse des ions Er³⁺.

Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Analyse de la dépolarisation induite en conoscopie



Dépolarisation insignifiante

Mise en évidence de contraintes et de macles au sein des cristaux de CaF_2



Légère dépolarisation



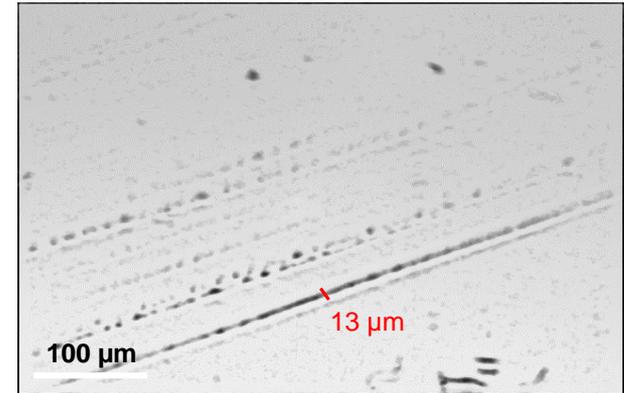
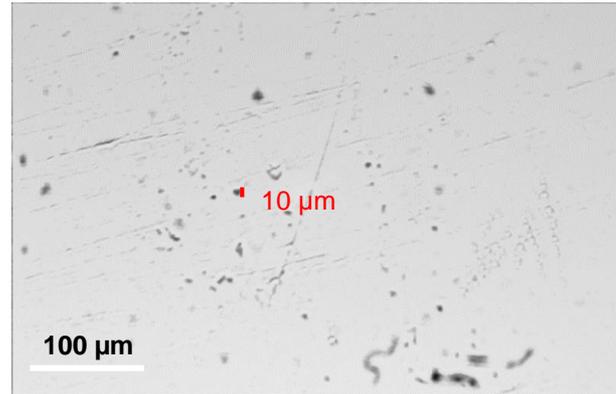
Dépolarisation non négligeable



Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ La microscopie optique polarisée en réflexion

Observation d'une portion de cristal en microscopie optique



➔ **Mise en évidence des défauts liés à la préparation des cristaux (découpe / polissage):**

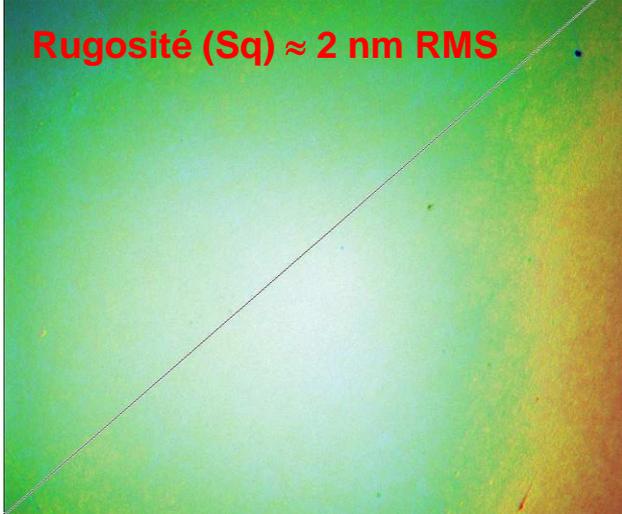
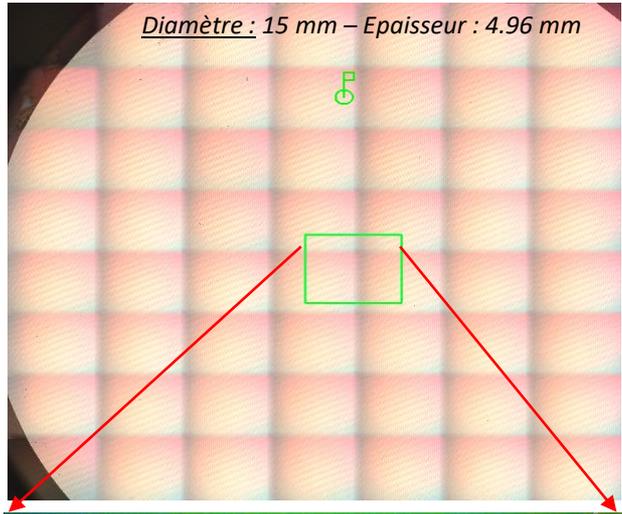
- Rayures;
- Cratères – arrachement de matière;
- Fissures - Fractures;

➔ **Limitations:** Observation d'une portion de cristal et non du cristal dans son ensemble en considérant le grossissement requis;

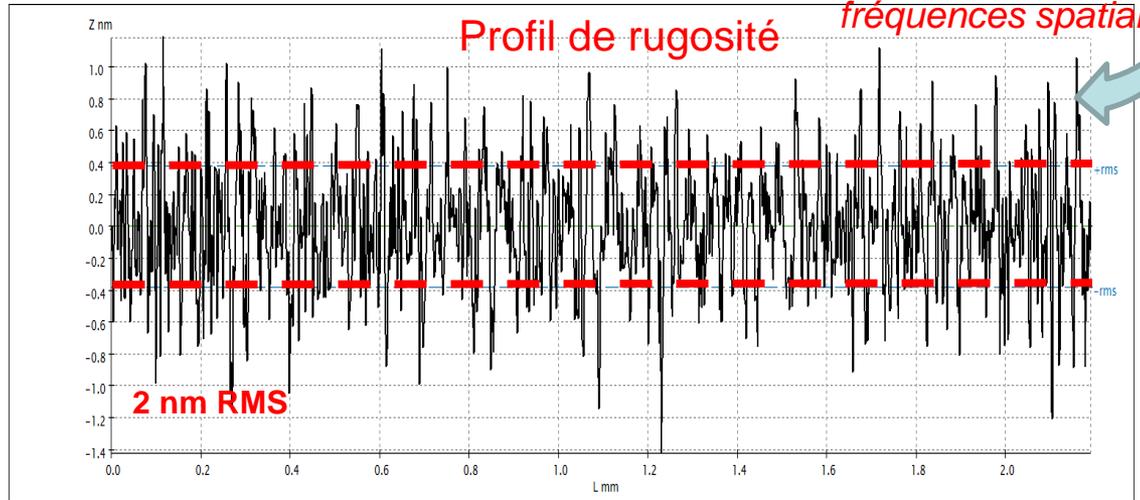
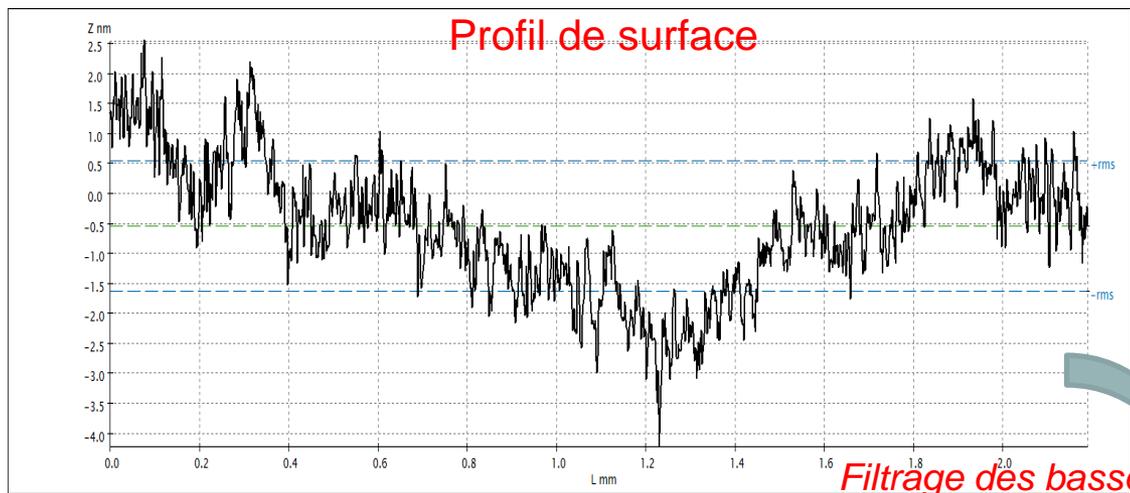
Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Mesure des profils de surface et de rugosité en microscopie interférométrique

(Microscope confocal / interférométrique Sensofar S-Neox)



Area: 1.75 x 1.32 mm²



Fltrage des basses fréquences spatiales

Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique

Brasse Gurvan



Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Caractérisation de la planéité des faces polies par interférométrie

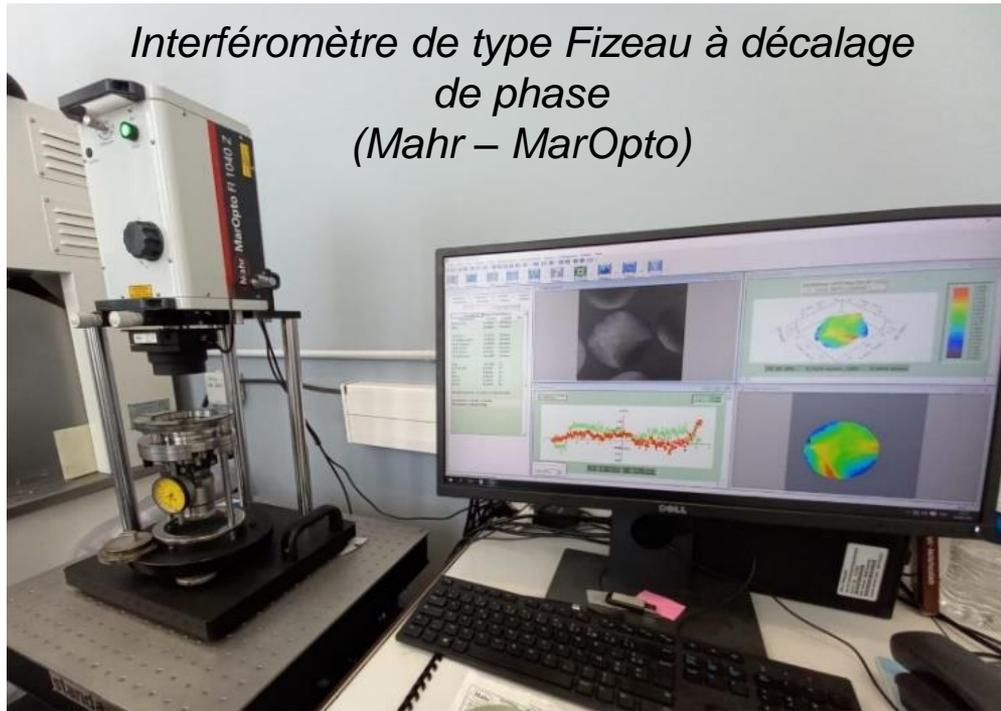
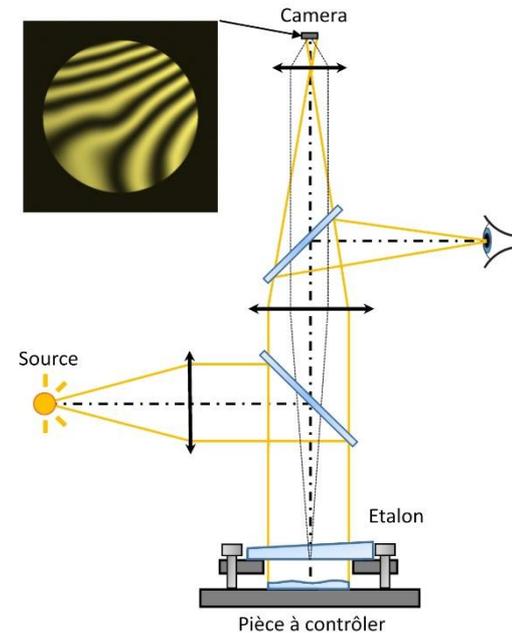


Schéma de principe



Planéité typiquement obtenue « en routine » sur le polissage de cristaux de fluorures:

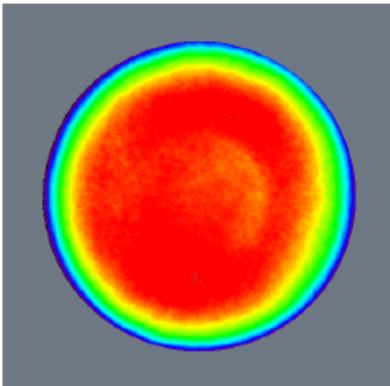
- $\lambda/10$ en PV (@546 nm)
- $\lambda/30$ RMS (@546 nm)

Record à $\lambda/22$ en PV (@546 nm) sur du CaF_2

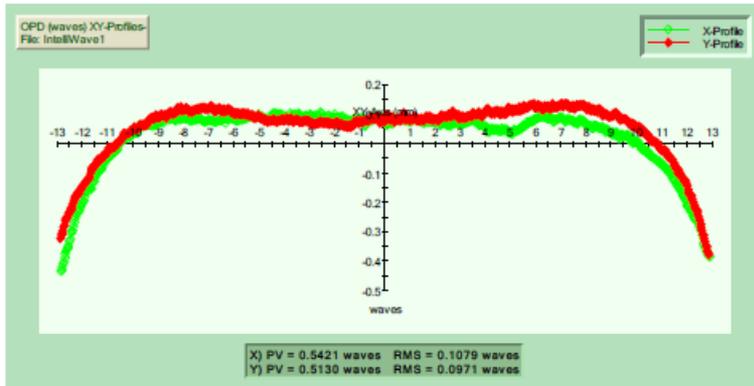
Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Caractérisation de la planéité des faces polies par interférométrie

2D View



Cross Section X / Y

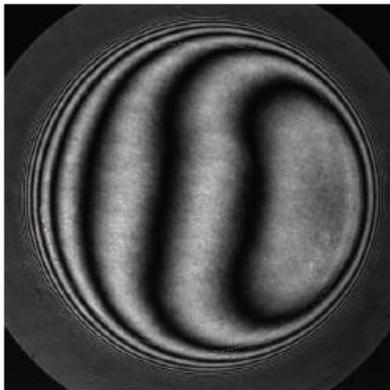


Results

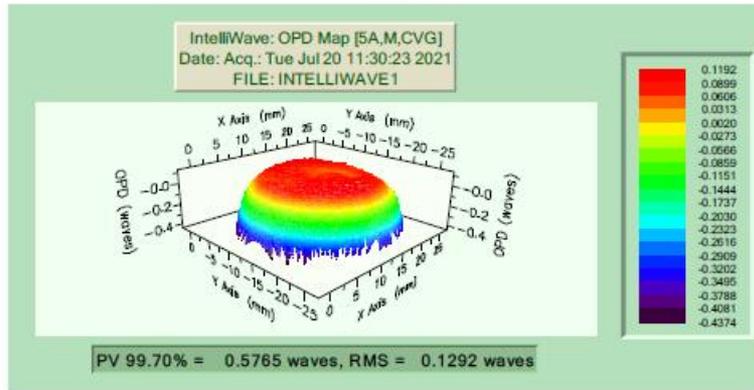
Sommaire rapport IntelliWave			
Paramètre	Valeur	Unités	QC
PV 99.70%	0.5765	Ondes	
RMS	0.1292	Ondes	
4) Focus	-0.1870	Ondes	
5) Astigmatism	-0.0356	Ondes	
6) XY Astigm	-0.0229	Ondes	
7) X Coma	0.0218	Ondes	
8) Y Coma	-0.0086	Ondes	
9) Spherical	-0.1469	Ondes	
Sag	-0.8667	fr	
IRR 99.70%	0.8522	fr	
RSI	0.6392	fr	
RMSt	0.2993	fr	
RMSI	0.1646	fr	
RMSa	0.0522	fr	
Date(measured): Tue Jul 20 11:53:15 2021			
Supprimés: X Incln., Y Incln.			
Traitement: [5A,M,CVG]			

fr @ 546nm

Interferogram



3D View



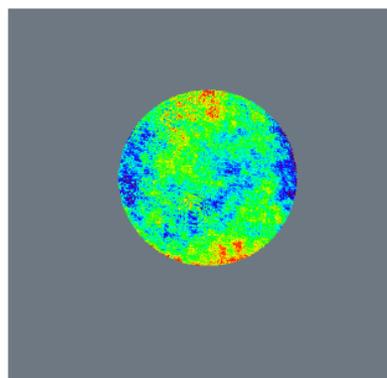
- $\lambda/2$ en PV (@546 nm)
- $\lambda/8$ RMS (@546 nm)

Substrat de CaF_2 – diamètre du champ d'observation 26 mm

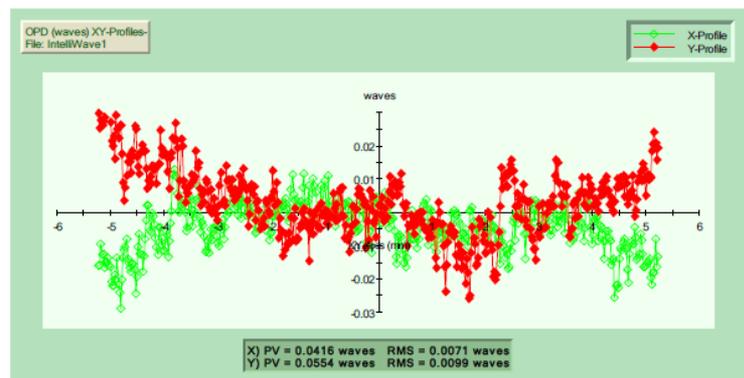
Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Caractérisation de la planéité des faces polies par interférométrie

2D View



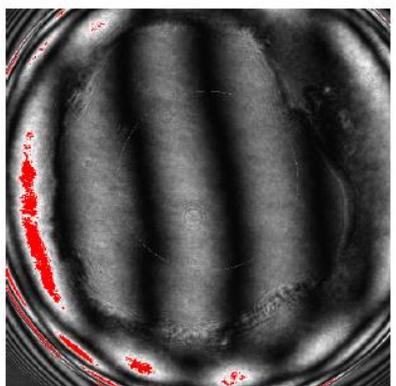
Cross Section X / Y



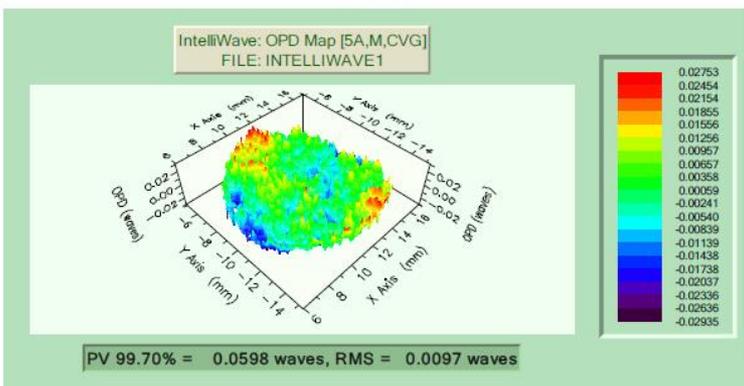
Results

Sommaire rapport IntelliWave			
Paramètre	Valeur	Unités	QC
PV 99.70%	0.0598	Ondes	
RMS	0.0097	Ondes	
4) Focus	0.0012	Ondes	
5) Astigmatism	-0.0135	Ondes	
6) XY Astigm	0.0037	Ondes	
7) X Coma	0.0020	Ondes	
8) Y Coma	0.0045	Ondes	
9) Spherical	-0.0018	Ondes	
Sag	0.0054	fr	
IRR 99.70%	0.1389	fr	
RSI	0.0079	fr	
RMSt	0.0225	fr	
RMSi	0.0225	fr	
RMSa	0.0223	fr	
Date(measured): Tue Jul 20 11:30:23 2021			
Supprimés: X Inclin., Y Inclin.			
Traitement: [5A,M,CVG]			

Interferogram



3D View



fr @ 546nm

- $\lambda/16$ en PV (@546 nm)
- $\lambda/103$ RMS (@546 nm)

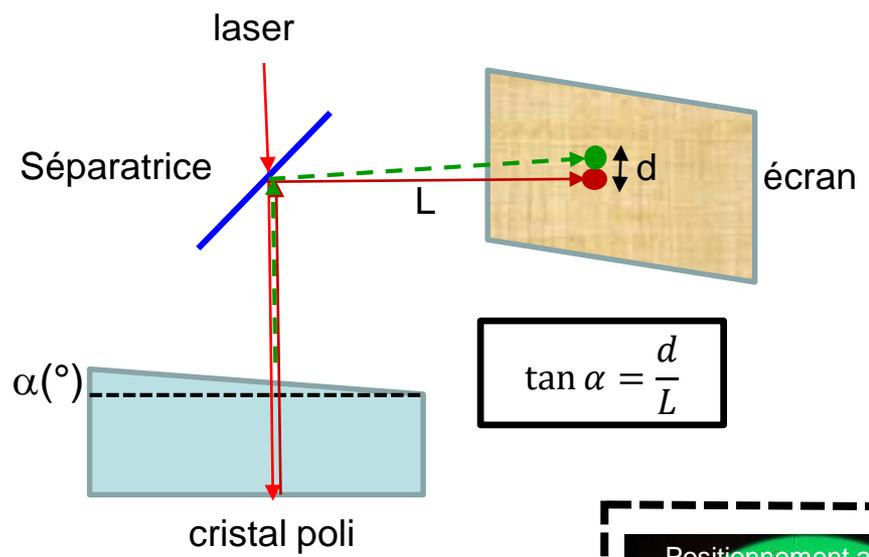
Substrat de CaF_2 – diamètre du champ d'observation 10 mm



Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

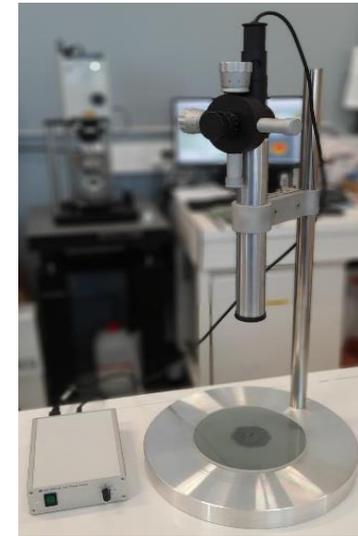
➔ Caractérisation du défaut de parallélisme entre les faces polies

Dispositif de contrôle « maison »



- Plus L est important, meilleure est la précision de la mesure

Lunette autocollimatrice



(Précision jusqu'à 15-30 sec d'arc, soit $0,004^{\circ}$ - $0,008^{\circ}$)

- Mesure du défaut de parallélisme ou du wedge;
- Polissage / mise en forme des cristaux en contrôlant l'angle du wedge;





Méthodes de caractérisations mises en oeuvre

➔ Caractérisation de l'orientation cristalline par DRX en Laue

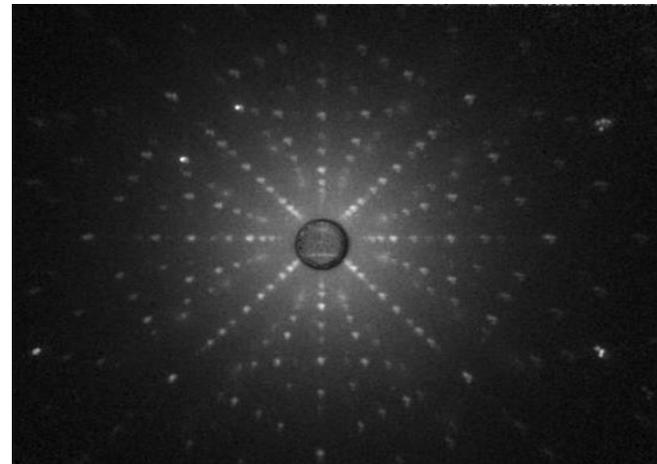
Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique



Diffractomètre à Rayons X de type Laue en réflexion pour orienter les cristaux



Cristal de $\text{LiYF}_4:\text{Tb}^{3+}$ en cours d'orientation au Laue



Cliché DRX Laue d'un cristal de CaF_2 orienté [100]

- **Découpe orientée des cristaux**
- **Vérification de la désorientation cristallographique de certains cristaux (précision de l'ordre du degré)**
- **Mise en évidence de macles**



Cristal de CaF_2 orienté [100] en cours de découpe à la scie à fil

nom



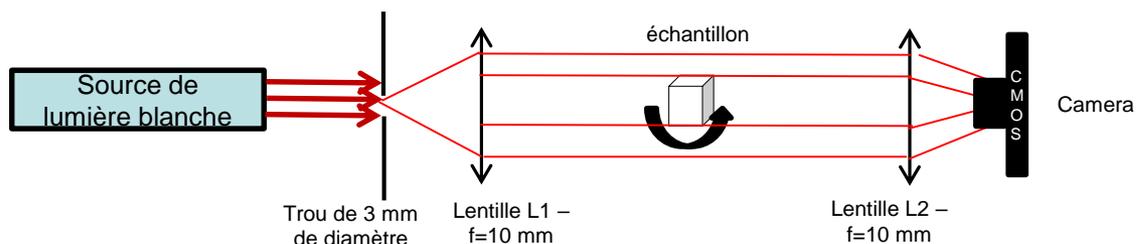
L'ombroscopie / La diascopie

L'ombroscopie / La diascopie

Principe de la méthode:

Observation sur un écran (ombroscopie) ou sur une caméra (diascopie) de l'ombre portée d'un objet transparent placé dans un faisceau de lumière parallèle statique.

Schéma du dispositif expérimental:

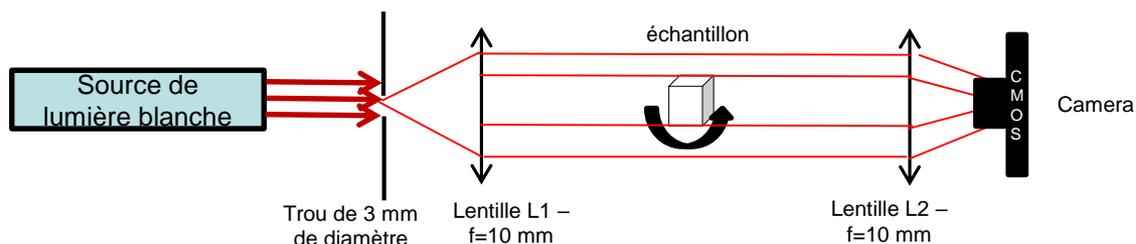


L'ombroscopie / La diascopie

Principe de la méthode:

Observation sur un écran (ombroscopie) ou sur une caméra (diascopie) de l'ombre portée d'un objet transparent placé dans un faisceau de lumière parallèle statique.

Schéma du dispositif expérimental:



Observation expérimentale:

Les défauts apparaissent en champ sombre sur un fond clair:

→ Visualisation des variations locales d'éclairement.

L'ombroscopie / La diascopie

Principes et explications physiques:

Perception d'un phénomène optique = Observation d'un objet d'amplitude

Méthode de visualisation basée sur le phénomène de **dévi**ation ou **d'obstruction** des faisceaux lumineux.

Objet parfaitement transparent = objet de phase



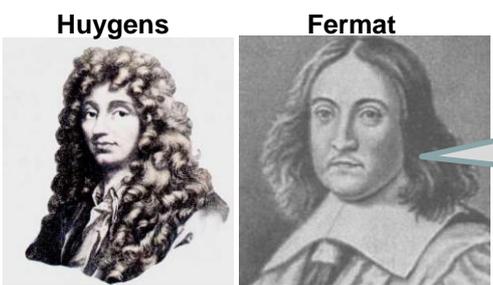
L'ombroscopie / La diascopie

Principes et explications physiques:

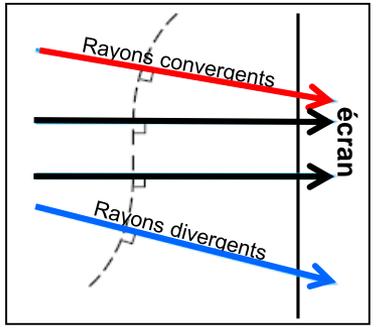
Perception d'un phénomène optique = Observation d'un objet d'amplitude

Méthode de visualisation basée sur le phénomène de **dévi**ation ou **d'obstruction** des faisceaux lumineux.

Objet parfaitement transparent = objet de phase



Toute différence de chemin optique entre deux rayons voisins implique une modification de leur orientation.



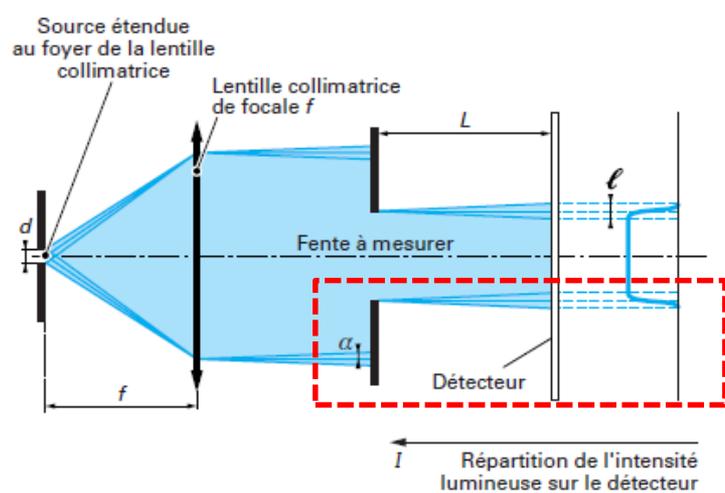
Gradients latéraux d'indice → **Déformation de l'onde émergente**

- Courbure de l'onde dirigée vers la source → { Les rayons émergents divergent (diminution de l'éclairement)
- Courbure de l'onde tournée vers l'aval → { Les rayons émergents convergent (augmentation de l'éclairement)

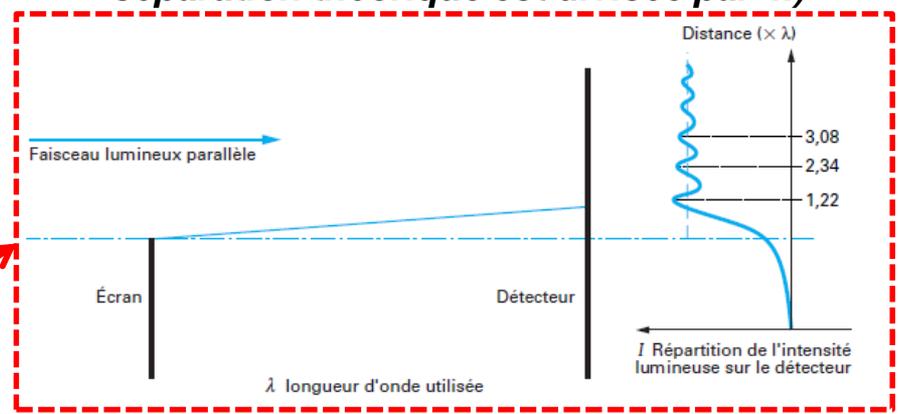
L'ombroscopie / La diascopie

Limitations de la mesure:

- La résolution du système de mesure est définie par celle du détecteur;
- La transition de l'ombre à la lumière n'est pas franche à cause de la diffraction;
- Parallélisme du faisceau favorisé par une source lumineuse ponctuelle;
- La répartition angulaire de l'intensité suivra une courbe d'Airy dans la cas d'une source ponctuelle;

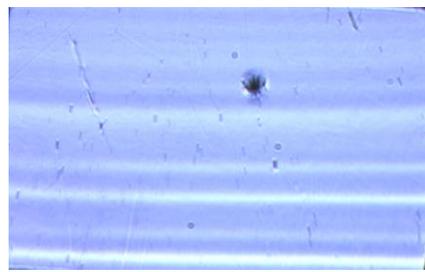


(L'intensité de l'éclaircissement à la limite de séparation théorique est divisée par 4.)



L'ombroscopie / La diascopie

Exemple de clichés ombroscopiques:

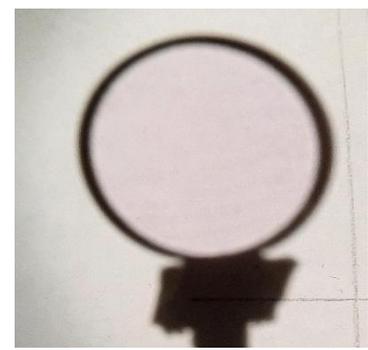


- Cristal présentant des **stries de croissance** = variation locale de l'indice de réfraction
(Rugosité de l'ordre du nm)

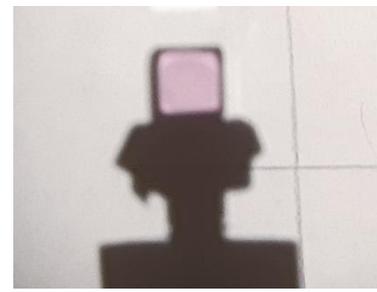
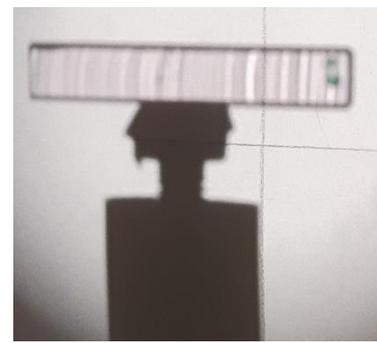


- Pas de gros défauts apparents;
(Rugosité de l'ordre du μm)

7.5 mm



- Rugosité de l'ordre de 1-2 nm
- Pas de stries de croissance
- Pas de défauts apparents



- Rugosité de l'ordre de 1-2 nm
- Présence de stries de croissance dans la plan parallèle à la direction de croissance (verticale)

L'ombroscopie / La diascopie

Avantages de cette méthode:



- Simplicité de mise en œuvre;
- Méthode non intrusive et non destructrice;
- Méthode très lumineuse;
- Bonne visualisation des défauts diffusants et des objets de phase;
- Bonne méthode qualitative pour déterminer spatialement la position des défauts;

Inconvénients de cette méthode:



- Par essence une ombre est toujours plus ou moins floue;
- Difficile à quantifier;
- Intégration de l'information sur toute l'épaisseur analysée;



La strioscopie

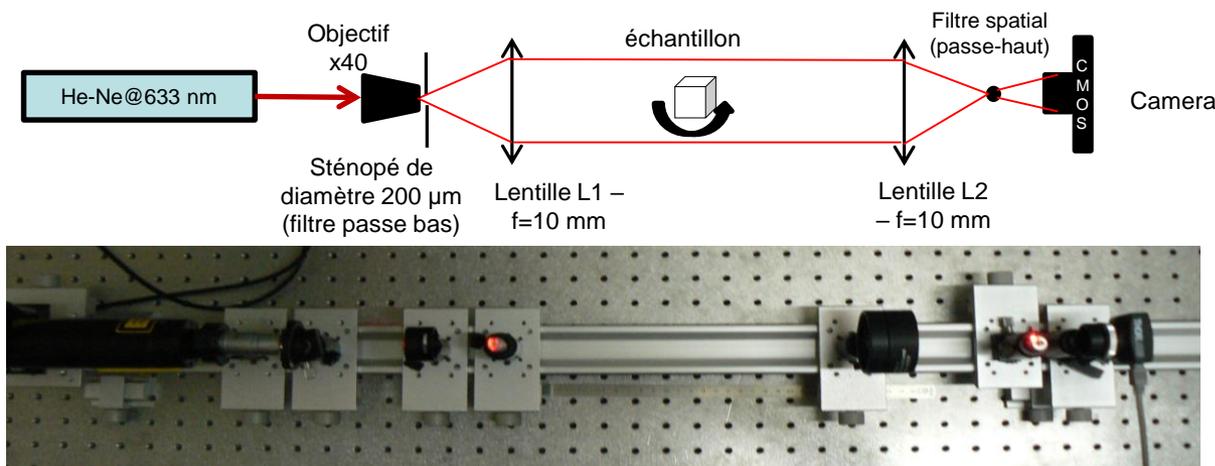
La strioscopie

Principe de la méthode:

- Méthode basée sur la déviation des faisceaux lumineux et le filtrage spatial des fréquences émergentes de l'objet.

→ Observation sur un écran des faisceaux déviés par les inhomogénéités présentes dans l'objet analysé, les faisceaux non déviés à la sortie de l'objet étant stoppés.

Schéma du dispositif expérimental:



Observation expérimentale:

Les défauts apparaissent en champ clair sur un champ sombre:

- Visualisation des inhomogénéités d'indice de réfraction dans la masse,
- Visualisation des défauts de surface (rayures, cratères, microfissures, rugosité).



La strioscopie

Principes et explications physiques:

En l'absence de défaut:

- Pas de déviation du faisceau, qui est entièrement intercepté par le stoppeur;
- Champ observé uniformément sombre;

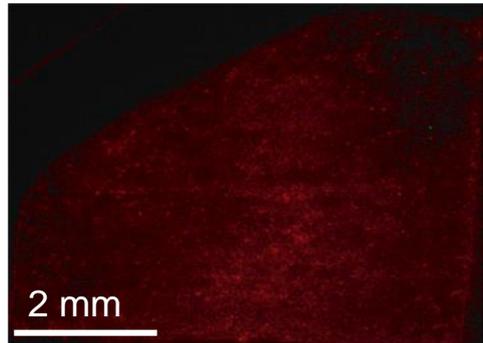
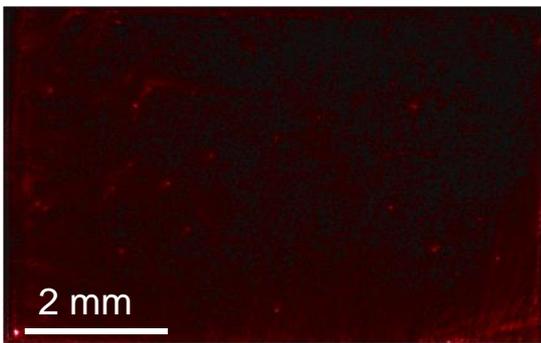


En présence de défaut:

Variation du chemin optique

- Déviation du faisceau d'un angle α ;

$$\alpha = \frac{e}{n} \left(\frac{\delta n}{\delta x} \right)$$

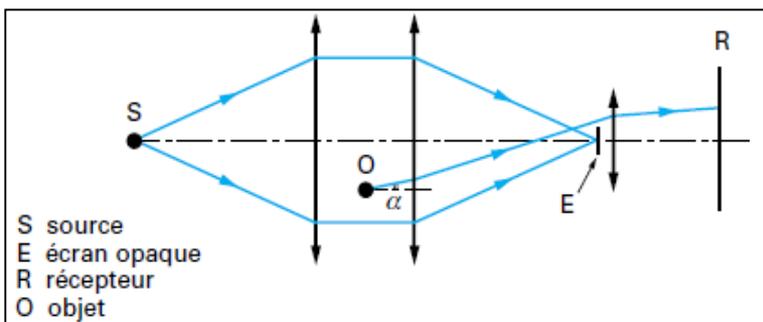


- Déviation d'une partie du faisceau d'une quantité $(n.\alpha.f)$, qui n'est pas intercepté par le stoppeur et qui éclaire l'écran;

- Observation de tâche claire sur champ sombre, dont la variation d'éclairement est:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{n.\alpha.f}{a}$$

Défauts, inhomogénéités → Contraste de phase

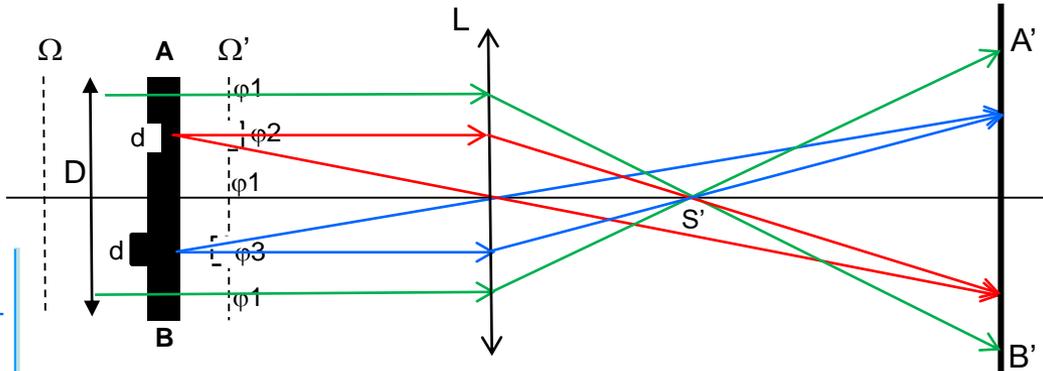


Brasse Gurvan

Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique

La strioscopie

Explications physiques du **contraste de phase**:



Onde initiale de front Ω et d'expression:

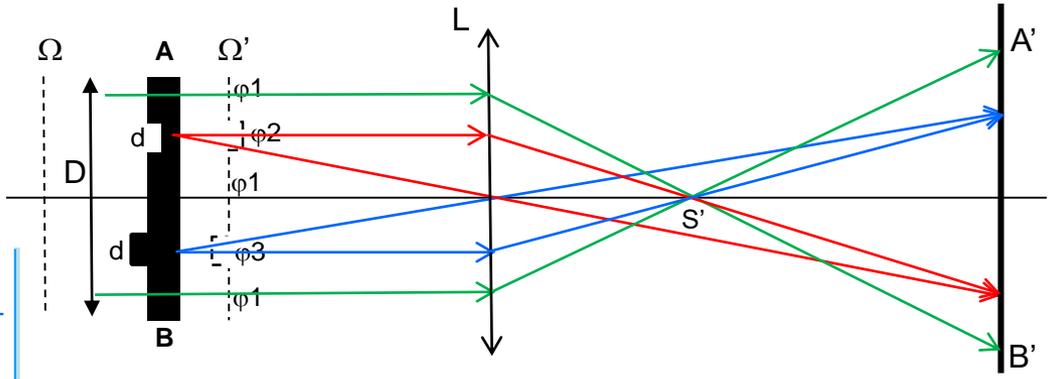
$$\Rightarrow V_0 = A \cdot \sin(\omega t)$$

(Objet éclairé en lumière cohérente et la face de sortie de AB est \perp aux rayons incidents
 \rightarrow **Egalité des phases dans ce plan**)

- Différence de phase φ entre les plans de fronts conjugués AB et A'B': $\Rightarrow V'_0 = A \cdot \sin(\omega t - \varphi)$

La strioscopie

Explications physiques du **contraste de phase**:



Onde initiale de front Ω et d'expression:

$$\Rightarrow V_0 = A \cdot \sin(\omega t)$$

(Objet éclairé en lumière cohérente et la face de sortie de AB est \perp aux rayons incidents
 \rightarrow **Egalité des phases dans ce plan**)

- Différence de phase φ entre les plans de fronts conjugués AB et A'B': $\Rightarrow V'_0 = A \cdot \sin(\omega t - \varphi)$

- Objet AB n'est plus d'épaisseur optique rigoureusement constante: $\Rightarrow \delta = (n - 1) \cdot \Delta e$
 (variations locales d'épaisseur (Δe) et d'indice de réfraction (Δn))

- Onde au regard de la **cavité** de diamètre d et d'épaisseur δe présente une **avance de phase** sur le front d'onde référence de phase φ_1 tel que: $\Rightarrow \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$

- Onde au regard de la **bosse** de diamètre d et d'épaisseur δe présente un **retard de phase** sur le front d'onde référence de phase φ_1 tel que: $\Rightarrow \varphi_3 < 0$

- **Expression de l'onde dans le plan conjugué:** $\Rightarrow V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi + \varphi_i)$

(Seule la phase subit des modifications locales, l'amplitude de vibration reste constante)

La strioscopie

Explications physique de la transformation d'un objet de phase en un objet d'amplitude:

Intensité de l'éclairement d'un point du plan image \propto au carré de l'amplitude de l'onde
(plan image uniformément éclairé, l'œil n'étant pas sensible aux phénomènes de phase)

$$V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi + \varphi_i) \iff V' = A \cdot \cos(\varphi_i) \sin(\omega t - \varphi) + A \sin(\varphi_i) \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

La strioscopie

Explications physique de la transformation d'un objet de phase en un objet d'amplitude:

Intensité de l'éclairement d'un point du plan image \propto au carré de l'amplitude de l'onde

(plan image uniformément éclairé, l'œil n'étant pas sensible aux phénomènes de phase)

$$V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi + \varphi_i) \iff V' = A \cdot \cos(\varphi_i) \sin(\omega t - \varphi) + A \sin(\varphi_i) \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

Hypothèse: les fluctuations locales de chemin optique introduite par l'objet restent petites par rapport à la longueur d'onde λ de la lumière.

$$\implies \varphi_i \ll \frac{\pi}{2} \quad \cos(\varphi_i) \approx 1 \quad \sin(\varphi_i) \approx \varphi_i$$

$$\implies V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi) + A \varphi_i \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

La strioscopie

Explications physique de la transformation d'un objet de phase en un objet d'amplitude:

Intensité de l'éclairement d'un point du plan image \propto au carré de l'amplitude de l'onde

(plan image uniformément éclairé, l'œil n'étant pas sensible aux phénomènes de phase)

$$V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi + \varphi_i) \iff V' = A \cdot \cos(\varphi_i) \sin(\omega t - \varphi) + A \sin(\varphi_i) \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

Hypothèse: les fluctuations locales de chemin optique introduite par l'objet restent petites par rapport à la longueur d'onde λ de la lumière.

$$\implies \varphi_i \ll \frac{\pi}{2} \quad \cos(\varphi_i) \approx 1 \quad \sin(\varphi_i) \approx \varphi_i$$

$$\implies V' = A \cdot \sin(\omega t - \varphi) + A \varphi_i \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

Onde V' = Superposition de 2 ondes V'_0 et V'_i .

$$\implies V'_0 = A \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{Onde principale stoppée en grande partie et non affectée par la variation de chemin optique})$$

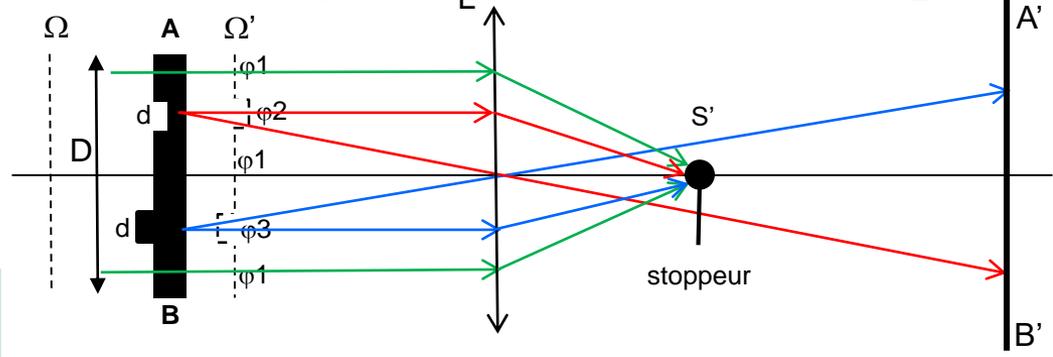
$$\implies V'_i = A \cdot \varphi_i \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (\text{Onde secondaire, pouvant être décomposée en ondelette partielles locales d'amplitude sensiblement constante et en quadrature avec l'onde principale})$$

Intensité observée $\propto (A\varphi_i)^2$ et aux variations de chemin optique



La strioscopie

Explications physiques du **filtrage spatial**:



Onde principale V_0 stoppée

➔ Tâche de diffraction très fine en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/D$), D étant le diamètre de la lentille.

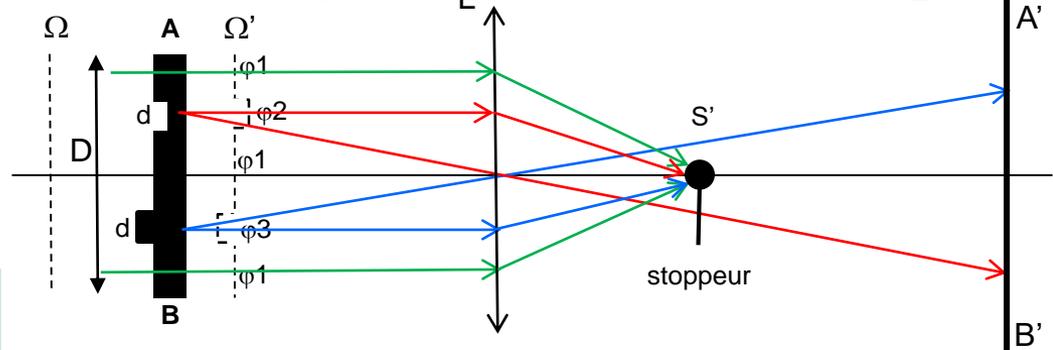
Onde secondaire V'_i

➔ Tâche de diffraction plus étendue en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/d$), d étant le diamètre de l'inhomogénéité.



La strioscopie

Explications physiques du **filtrage spatial**:



Onde principale V_0 stoppée

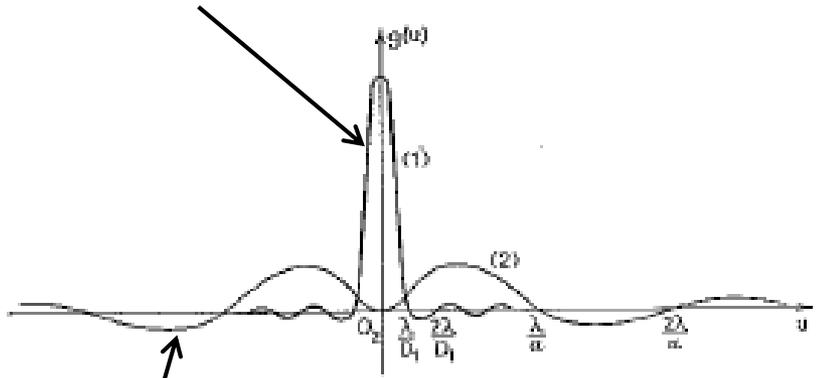
➡ Tâche de diffraction très fine en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/D$), D étant le diamètre de la lentille.

Onde secondaire V'_i

➡ Tâche de diffraction plus étendue en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/d$), d étant le diamètre de l'inhomogénéité.

Ondelettes secondaires provenant des vibrations lumineuses « diffractées » par les irrégularités de l'objet.

(1) Fonction de diffraction de l'onde principale



(2) Fonction de diffraction résultante des ondelettes secondaires

➡ Séparation spatiale des ondes V_0 et V'_i

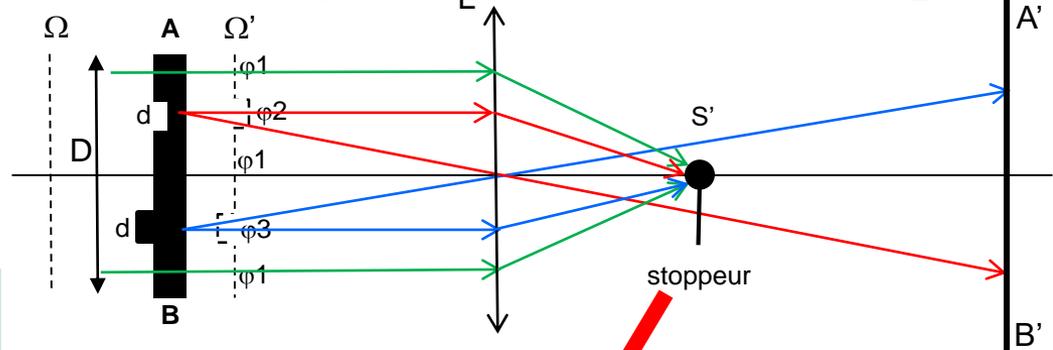
➡ Recouvrement de la tache centrale et des premiers anneaux de diffraction de l'onde principale par le stoppeur

➡ Léger voile sur le plan image, surtout sensible sur les bords de l'image
(résidu de l'onde principale)



La strioscopie

Explications physiques du **filtrage spatial**:



Onde principale V_0 stoppée

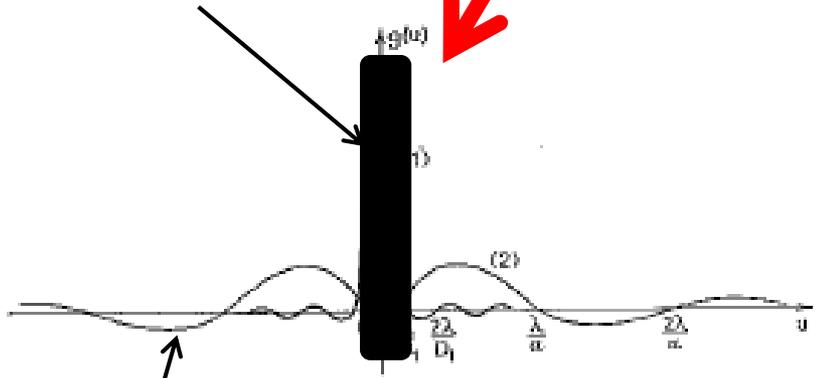
➡ Tâche de diffraction très fine en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/D$), D étant le diamètre de la lentille.

Onde secondaire V'_i

➡ Tâche de diffraction plus étendue en S' de diamètre angulaire ($2 \times 1.22/d$), d étant le diamètre de l'inhomogénéité.

Ondelettes secondaires provenant des vibrations lumineuses « diffractées » par les irrégularités de l'objet.

(1) Fonction de diffraction de l'onde principale



(2) Fonction de diffraction résultante des ondelettes secondaires

➡ Séparation spatiale des ondes V_0 et V'_i

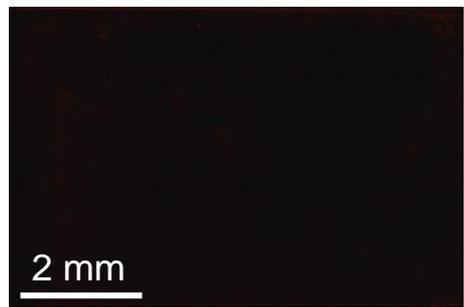
➡ Recouvrement de la tache centrale et des premiers anneaux de diffraction de l'onde principale par le stoppeur

➡ Léger voile sur le plan image, surtout sensible sur les bords de l'image
(résidu de l'onde principale)

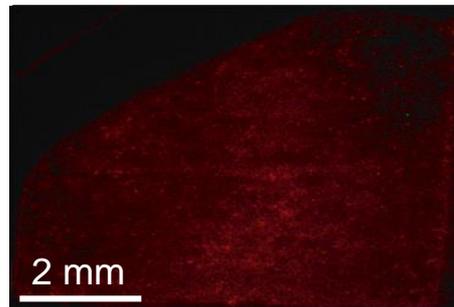


Analyse des cristaux en strioscopie

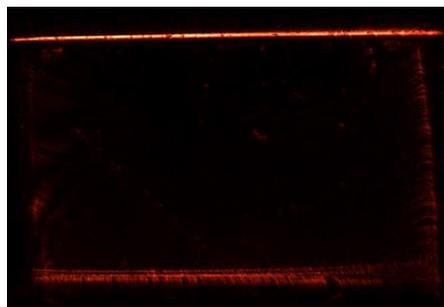
➔ **Approche qualitative rapide et efficace:** donne une information sur l'état des surfaces et sur le volume (*voir petit film*).



Cristal poli qualité laser « CaF₂:Yb³⁺ »



Cristal « CaF₂:Yb³⁺ » poli qualité spectro dont les faces n'ont pas la même taille

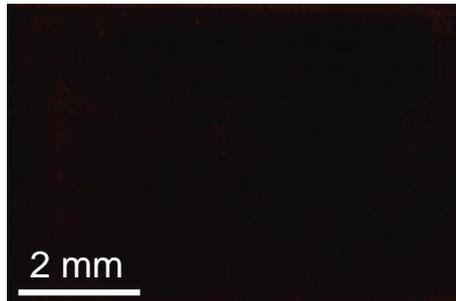


Visualisation des défauts présents dans la masse (Voir film)

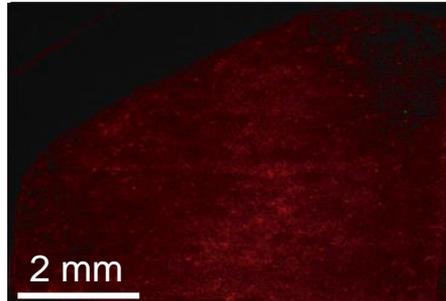


Analyse des cristaux en strioscopie

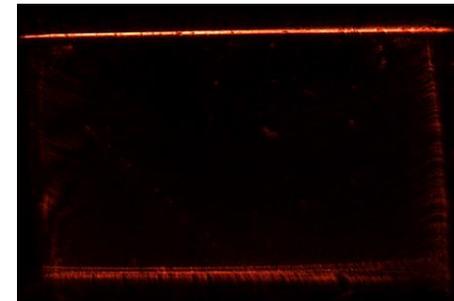
➔ **Approche qualitative rapide et efficace:** donne une information sur l'état des surfaces et sur le volume (*voir petit film*).



Cristal poli qualité laser « $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$ »



Cristal « $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$ » poli qualité spectro dont les faces n'ont pas la même taille



Visualisation des défauts présents dans la masse (Voir film)

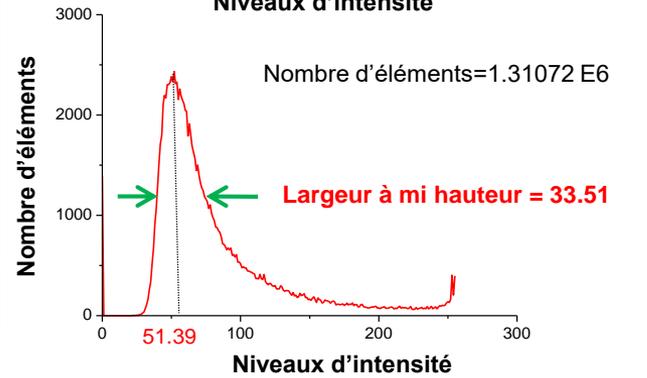
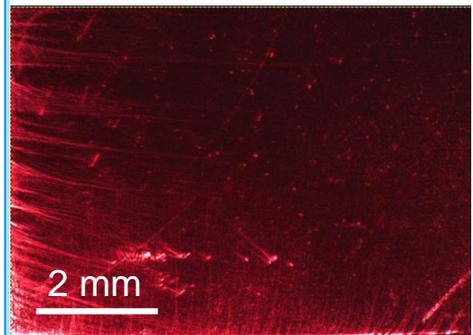
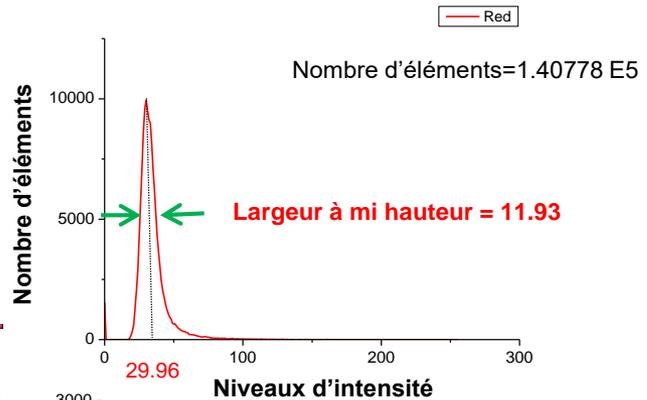
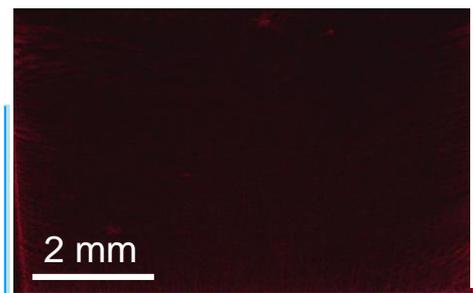
➔ **Nécessité de mettre en place des critères quantitatifs pertinents et fiables pour comparer la qualité des cristaux étudiés**

➔ **Une tentative de quantification basée sur le traitement de l'image et une approche statistique est proposée;**



Approche statistique pour le traitement quantitatif des résultats en strioscopie

➡ Réaliser un histogramme des valeurs d'intensité des clichés obtenus en strioscopie



➡ **Critères de comparaison:**

- Valeur du niveau d'intensité au maximum de population $I(\sigma_{max})$;
- Largeur à mi-hauteur de la distribution (FWHM);

➡ **Comparaison de la qualité optique des cristaux:**

- $I(\sigma_{max})$ d'autant plus petite que la qualité optique du cristal est bonne;
- FWHM d'autant plus faible que la qualité optique du cristal est bonne;

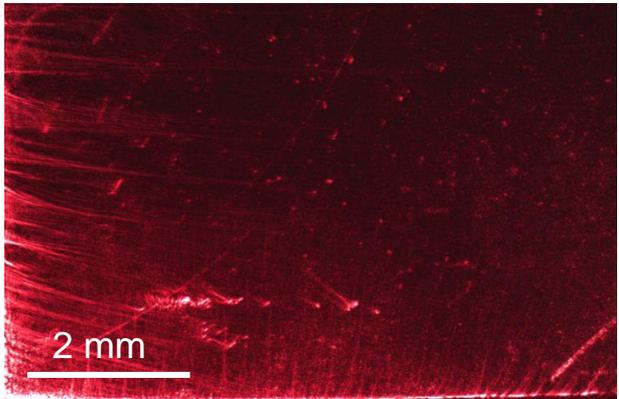
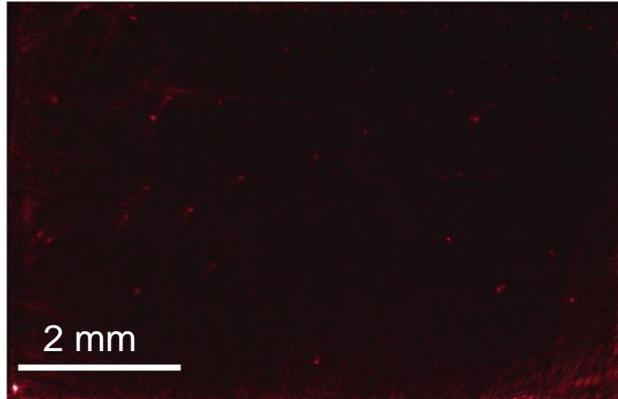
➡ Possible d'appliquer des outils statistiques fiables aux histogrammes ainsi définis et de définir des critères de comparaison pertinents;

Sensibilité des résultats obtenus en strioscopie

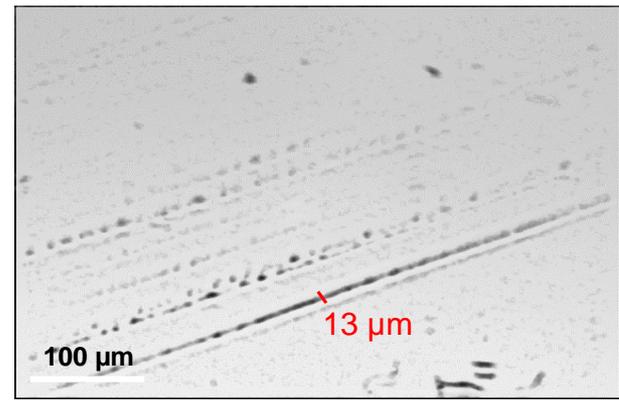
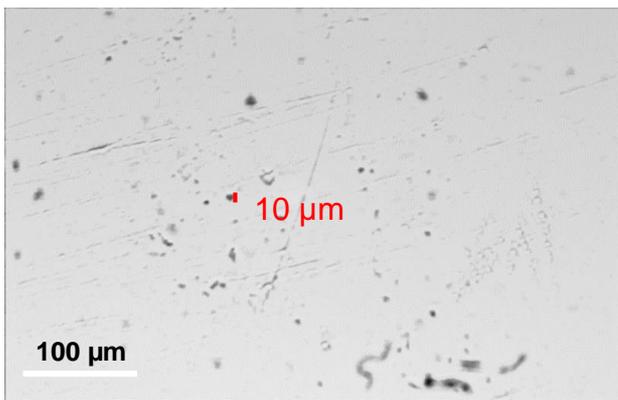
➡ **Corrélation entre clichés obtenus en strioscopie et observation en microscopie optique**

➡ Révélation de défauts de 10-20 μm de diamètre / largeur en strioscopie;

Observation du cristal entier en strioscopie



Observation d'une portion de cristal en microscopie optique



Analyse des cristaux en strioscopie

➤ Limitations des ces méthodes:



- Nécessaire de travailler avec des paramètres d'acquisition de la caméra constants;
- Méthode de traitement limiter par la forme et les dimensions du cristal (parrallépipèdes, disques);
- Les cristaux taillés à l'incidence de Brewster ne peuvent pas être analysés dans cette configuration expérimentale;

➤ Avantages des ces méthodes:



- Relativement simple à mettre en œuvre et peu coûteux;
- Méthodes non destructrices et non intrusives sur l'échantillon;
- Possibilité d'observer aisément les défauts de surface;
- Bonne sensibilité permettant de visualiser des défauts de surface de quelques microns;
- Possibilité de déterminer des critères qualité quantitatifs pertinents;

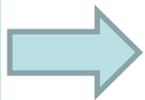


Merci pour votre attention!

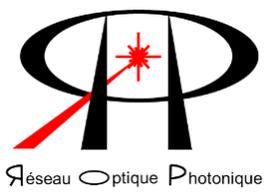
CiMap



Il fait aussi beau en Normandie: La preuve !



Organisation d'une journée « Plateforme matériaux pour l'optique » au CIMAP à Caen en Novembre 2021



Réseau Optique Photonique



gurvan.brasse@ensicaen.fr
Abdelmjid.benayad@ensicaen.fr
Patrice.camy@ensicaen.fr