

Métrie à SOLEIL : optique en rayons X

Pascal MERCÈRE

Ligne de Métrie et Tests - Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, 91190 Gif-sur-Yvette

pascal.mercere@synchrotron-soleil.fr

Les sources de 3^e et 4^e générations permettent aujourd'hui de produire des faisceaux de rayonnement X aux propriétés remarquables en termes de brillance, d'énergie et de cohérence, constituant des outils extrêmement puissants pour explorer la matière. Pour exploiter au mieux ces performances, et notamment afin de préserver la qualité optique de ce rayonnement, les optiques rayons X (réfléchissantes, diffractives ou réfractives), intervenant dans le transport et la mise en forme spatiale et spectrale des faisceaux, deviennent elles aussi de plus en plus exigeantes, tant du point de vue des procédés de fabrication mis en œuvre que de leur intégration et alignement sur les lignes de lumière.

Aux longueurs d'onde les plus courtes de ce domaine, les tolérances sur la forme des surfaces optiques (miroirs X utilisés généralement sous incidence très rasante) peuvent ainsi atteindre quelques fractions de nanomètre, et les différences de chemins optiques à analyser sur faisceau, atteindre le picomètre. Garantir les conditions d'éclairage requises sur l'échantillon constitue donc l'un des enjeux majeurs des installations exploitant ce rayonnement. Dans ce contexte, le développement d'une instrumentation *in situ* offrant de hautes performances métrologiques en termes de précision et de sensibilité sur la surface d'onde est indispensable.

Des techniques complémentaires

Au synchrotron SOLEIL, deux techniques de métrologie rayons X sont développées simultanément : la première basée sur la technique Hartmann est développée depuis plus d'une dizaine d'années ; la seconde basée sur l'interférométrie à décalage quadrilatéral est développée depuis 2010 en collaboration avec le Département d'Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA (Palaiseau, Essonne). Ces deux techniques apparaissent, l'une comme l'autre, parfaitement adaptées au domaine des rayons X, offrant les performances de

mesure requises, tout en alliant flexibilité, robustesse et simplicité de mise en œuvre. Leur complémentarité justifie également leur développement respectif.

Dans le cas de la technique Hartmann (figure 1), le front d'onde incident est échantillonné spatialement par une matrice régulière de trous (masque d'amplitude pure), conduisant à un réseau bidimensionnel de taches dans le plan

de détection. L'analyse de la déformation de ce maillage permet d'accéder aux gradients de phase dans les deux dimensions, garantissant ainsi une reconstruction robuste de la surface d'onde. L'approche étant ici purement géométrique, cette technique présente l'avantage d'être totalement achromatique, ce qui la rend aussi très flexible. L'interférométrie X à décalage quadrilatéral utilise, quant à elle, un composant diffractif plan (réseau bidimensionnel de phase) permettant de générer quatre répliques, légèrement basculées, de l'onde incidente (figure 2). Le décalage latéral introduit par propagation entre ces quatre répliques conduit à une figure d'interférence dans leur zone de recouvrement, constituant ainsi une porteuse bidimensionnelle comparable à celle obtenue par technique Hartmann. Une analyse similaire donne alors accès en une seule image à l'information de phase recherchée. Bien qu'il s'agisse ici d'une approche à caractère chromatique, des travaux récents ont permis d'établir en rayons X des régimes d'invariance de la figure d'interférence. Comparée à la technique Hartmann, l'interférométrie à décalage quadrilatéral se distingue surtout par une plus haute résolution spatiale, qui dans certains cas apparaît nécessaire compte tenu des faibles dimensions transverses que peuvent atteindre les faisceaux X à analyser.

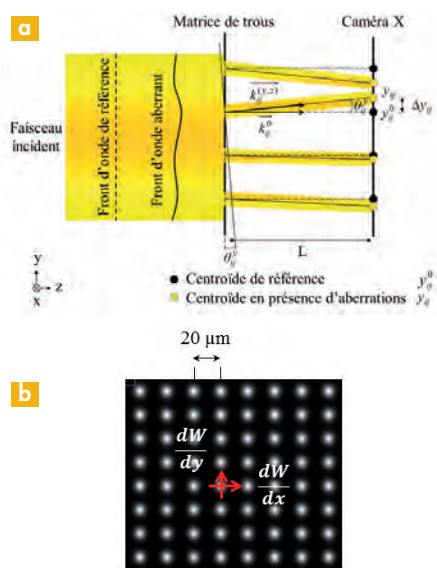


Figure 1. (a) Principe de la technique Hartmann et (b) Hartmannogramme obtenu en rayons X. Les positions des taches dans le plan de détection donnent accès aux pentes locales de la surface d'onde. Le pas de la matrice est fixé de manière à éviter les interférences entre taches.

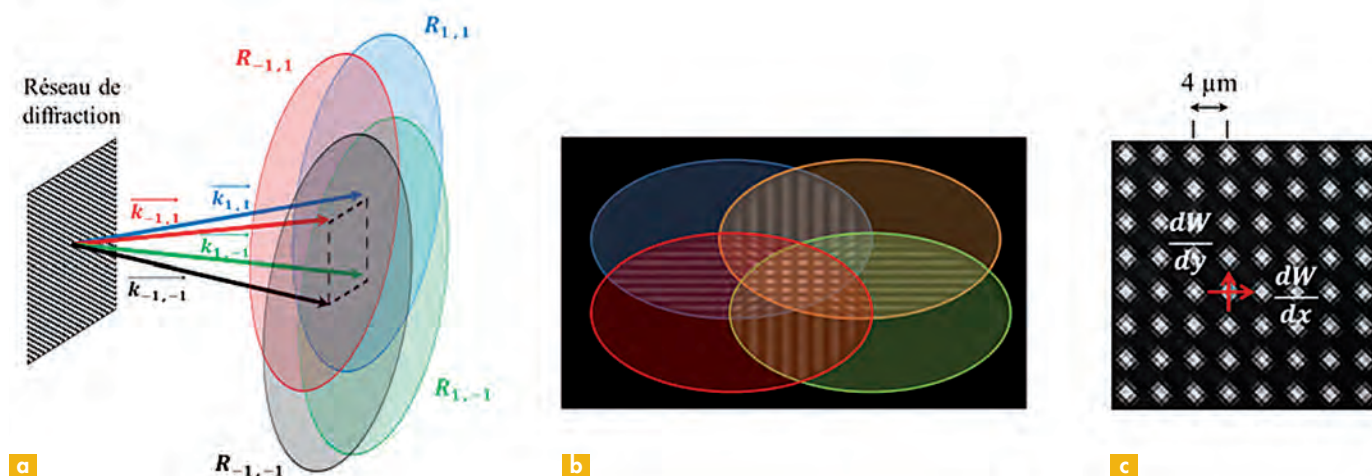


Figure 2. (a) Principe de l'interférométrie à décalage quadrilatéral, (b) interférogramme simulé (volontairement exagéré en propagation) mettant en évidence les interférences à deux, trois et quatre ondes dans les différentes zones de recouvrement des quatre ordres diffractés par le réseau et (c) interférogramme obtenu en rayons X.

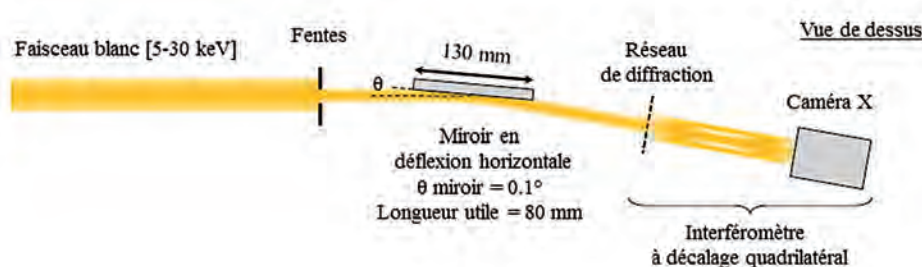
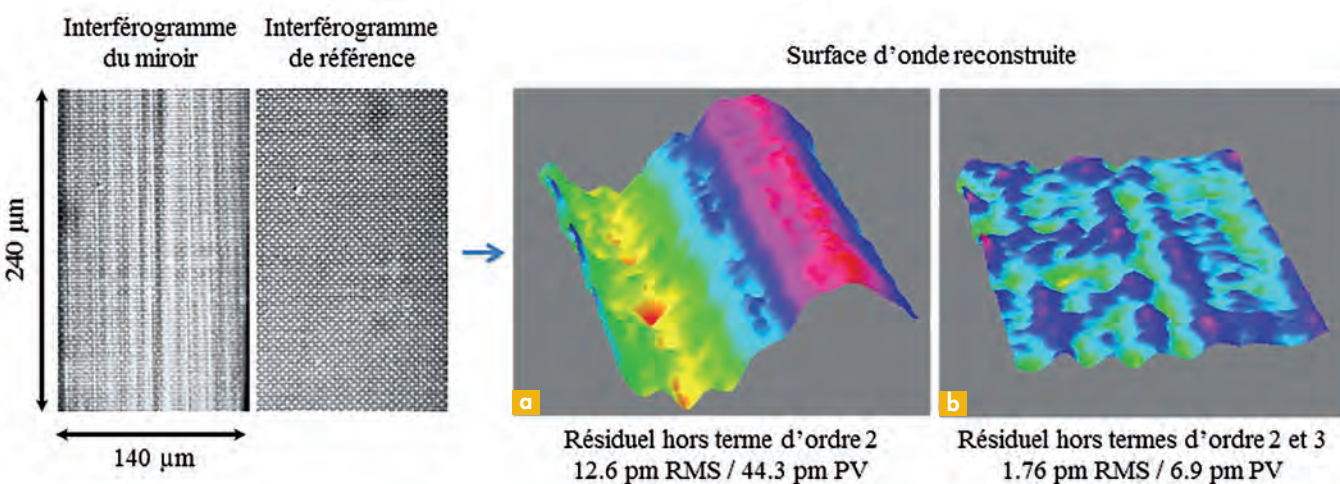


Figure 3. Métrologie rayons X d'un miroir plan limité par la diffraction. Le champ de mesure de $140 (H) \times 240 (V) \mu\text{m}^2$ correspond à la zone utile de l'optique ($80 \text{ mm } (H) \times 240 \mu\text{m } (V)$) projetée sous une incidence de 0.1° . Les défauts de surface d'onde introduits par le miroir sont donnés après soustraction du terme d'ordre 2 (a), et après soustraction des termes d'ordres 2 et 3 (b). Ce miroir en silicium a été réalisé par la société SESO-Thalès par technique de polissage déterministe.



Vers des précisions sub-picométriques

Entre autres similitudes, ces senseurs de front d'onde ont pour point commun d'être sensibles à la dérivée de la surface d'onde, avec une sensibilité de mesure qui dépend de la distance entre le plan d'échantillonnage (ou de diffraction) et le plan d'observation.

Leur dimensionnement est facilement ajustable en fonction des applications ciblées, des conditions d'éclairage, ou encore des performances de mesure recherchées. Ils sont aussi insensibles aux vibrations et aux fluctuations d'intensité du faisceau dans la pupille d'analyse. Enfin, l'utilisation d'un unique composant optique, nécessaire à l'extraction de l'information de phase,

les rend particulièrement robustes et simples d'emploi.

Toutefois, l'accès à des mesures quantitatives et absolues de haute précision (typiquement au dixième de picomètre) ne peut se faire sans la mise en œuvre de composants optiques et de détecteurs de haute qualité et parfaitement caractérisés. Il implique aussi le développement des procédés de calibration appropriés,

ainsi que l'optimisation des algorithmes, conjointement au développement de nouvelles méthodes mathématiques, nécessaires au traitement des images, l'analyse des données et l'évaluation de l'erreur de mesure.

En rayons X-durs, les développements réalisés nous permettent d'atteindre aujourd'hui cette précision sub-picométrique sur la surface d'onde, avec des champs de mesure jusqu'à $2 \times 2 \text{ mm}^2$ et des résolutions spatiales jusqu'à $4 \text{ }\mu\text{m}$.

Exemple d'un miroir plan « limité par la diffraction »

La *figure 3* présente la caractérisation par interférométrie X d'un miroir plan dit « limité par la diffraction ». Courbé mécaniquement à la forme elliptique parfaite, ce miroir doit permettre de concentrer les rayons X dans une tache focale d'une centaine de nanomètres (limite de diffraction) à une énergie de 20 keV ($\lambda = 0,62 \text{ \AA}$). Pour

atteindre ces performances de focalisation ultime, ses défauts de forme en condition de fonctionnement (miroir courbé) ne doivent pas excéder $0,7 \text{ nm RMS}$ en regard de la forme elliptique idéale.

Les mesures de caractérisation ont été réalisées sur la ligne de Métrologie et Tests du synchrotron SOLEIL. Le miroir y a été placé sous éclairage large bande [$5\text{--}30 \text{ keV}$], sous une incidence rasante de $0,1^\circ$. La surface d'onde réfléchie par le miroir a été mesurée, dans ces conditions, à $1,76 \pm 0,14 \text{ pm RMS}$ – hors termes de basses fréquences, d'ordres 2 et 3 ; ces derniers seront corrigés dynamiquement en condition de fonctionnement par le système mécanique de cintrage du miroir (courbeur mécanique à deux actionneurs). Ramenées dans le référentiel du miroir, c'est-à-dire observées à la normale du miroir, ces aberrations résiduelles du front d'onde correspondent à un défaut de planéité de la surface optique de $0,5 \pm 0,04 \text{ nm RMS}$, en accord avec la qualité optique requise.

Un outil de diagnostic unique

Ces mesures démontrent la potentialité des techniques mises en œuvre dans un domaine applicatif, comme celui de la métrologie optique rayons X, où les exigences en termes de résolution spatiale, de précision et de sensibilité de mesure sont extrêmes. Avec des performances à l'état de l'art, cette instrumentation constitue un outil de diagnostic unique pour la compréhension des divers processus de génération du rayonnement X, l'optimisation des sources, la caractérisation haute résolution d'optiques X élémentaires dans leurs conditions de fonctionnement, ou encore l'alignement optimal des lignes de lumière, y compris la correction *in situ* des faisceaux par le biais d'optiques déformables.

Remerciements :

Ce travail a bénéficié d'un financement du RTRA Triangle de la Physique, convention 2010-076T, et de l'Agence Nationale de la Recherche, convention ANR 09-NANO-008-AXOC.

Précisément les
produits dont vous
avez besoin pour
votre application

Les marques de la plateforme IDEX Optics & Photonics ont soigneusement sélectionné pour vous des lasers et des composants optiques performants, fiables et de qualité. Notre site IDEX Optics & Photonics Marketplace propose des optiques laser dans des versions standards et semi-custom.

Trouvez facilement ce que vous cherchez à :
marketplace.idexop.com
01 30 12 06 80

IDEX
OPTICS & PHOTONICS
MARKETPLACE

ADVANCED THIN FILMS

CVI Laser Optics

MELLES GRIOT

Semrock