

1 Introduction

Lorsqu'on éclaire une surface rugueuse, un mur par exemple, avec de la lumière laser, on observe un aspect granulaire de la lumière diffusée : il y a une alternance de petits grains lumineux et de petits grains noirs répartis uniformément en moyenne. Il ne s'agit pas d'une illusion d'optique, mais d'un phénomène bien réel nommé speckle en anglais, tavelures ou granularité laser en français. Nous nous proposons d'étudier ce phénomène : origine, interprétation, applications.

2 Mise en évidence expérimentale

On éclaire une surface rugueuse ou un dépoli avec un laser, et on place un écran sur le chemin de la lumière diffusée. On observe des grains de speckle.

Si on effectue la même expérience avec une source lumineuse autre qu'un laser, il n'y a pas de speckle.

Première conclusion : l'apparition du speckle requiert une source lumineuse suffisamment cohérente.

Lorsqu'on observe le speckle, la taille des grains augmente lorsqu'on éloigne l'écran de la surface diffusante.

Lorsqu'on augmente la surface éclairée, la taille des grains diminue. Cela peut se faire à l'aide d'une lentille qui fait converger puis diverger le faisceau. La position relative de la lentille et de la surface diffusante détermine la taille de la surface éclairée. Celle-ci est minimale lorsque la surface est au foyer de la lentille : on a alors les plus gros grains de speckle.

Si on diminue la longueur d'onde du laser, la taille des grains diminue.

Une étude expérimentale quantitative montre que la taille d des grains est proportionnelle à $\lambda L/D$ où λ est la longueur d'onde, L la distance de la surface à l'écran et D le diamètre de la surface éclairée.

Deuxième conclusion : cette expression de la taille d'un grain fait penser à celle d'un interfrange dans le cas d'interférences ou à celle d'une tache de diffraction. Il est donc vraisemblable que des phénomènes d'interférence et de diffraction interviennent dans la formation du speckle. Cela recoupe la nécessité d'une source suffisamment cohérente.

3 Interprétation du speckle

Une surface rugueuse peut être vue comme composée de diffuseurs aléatoires. Les ondes émises par ces diffuseurs interfèrent. Si D est la plus grande distance entre diffuseurs, l'interfrange des interférences sera de l'ordre de $\lambda L/D$. On retrouve la taille des grains de speckle.

On peut aussi voir l'obtention de speckle comme la diffraction de la lumière laser par une ouverture de diamètre D et contenant des diffuseurs de diamètre g répartis aléatoirement. L'ouverture de diamètre D donne une figure de diffraction de taille $d = 1,22\lambda L/D$, soit la taille des grains de speckle, et la dimension de speckle visible due à un seul diffuseur est de l'ordre de $\lambda L/g$. Les grains de speckle sont répartis uniformément en moyenne sur cette dimension si les diffuseurs sont répartis uniformément sur la surface diffusante.

On voit que la taille des grains de speckle est indépendante de la taille et de la répartition des diffuseurs. Mais la répartition précise des grains de speckle dépend de celle des diffuseurs.

4 Speckle objectif et speckle subjectif

Pour étudier le speckle, on peut soit le projeter sur un écran, comme cela a été fait jusqu'à présente, soit l'observer directement sur la surface diffusante à l'aide d'un instrument d'optique (œil, caméra munie d'un objectif...)

4.1 Le speckle objectif

Le speckle objectif est observé lorsqu'on le projette sur un écran. Ses caractéristiques ont été étudiées ci-dessus.

4.2 Le speckle subjectif

On observe le speckle directement sur la surface diffusante à l'aide d'une lentille. Cette lentille fait l'image de la surface diffusante sur un écran (ou capteur CCD, rétine...) et on note L' la distance de la lentille à l'écran. Le diamètre de la lentille est D et f' est sa distance focale.

On peut montrer que la taille d'un grain de speckle sur l'écran est $d = 1,22\lambda L'/D$. Avec la relation de Descartes pour les lentilles minces, on peut exprimer L' en fonction de f' et de la distance p entre la surface et la lentille. Si $p \gg f'$, on a $L' \simeq f'$: alors $d = 1,22\lambda f'/D = 1,22\lambda N.O.$ où $N.O. = f'/D$ est le nombre d'ouverture de la lentille.

L'épaisseur (profondeur) d'un grain de speckle est $s = 8\lambda N.O.^2$.

La différence principale entre le speckle objectif et le speckle subjectif est que ce dernier change selon le point de vue dont on le regarde (si on tourne la tête par exemple), alors que le speckle objectif reste inchangé.

5 Interférométrie de speckle

5.1 En astronomie

La lumière provenant des étoiles doit traverser l'atmosphère avant d'arriver sur le miroir des télescopes. Or l'atmosphère est sujette à des turbulences qui diffusent la lumière, et qui varient dans le temps. Ces turbulences empêchent les télescopes d'atteindre leur limite de résolution fixée par la diffraction. Imaginons que l'on veuille séparer deux étoiles proches. On procède ainsi :

- On prend des images à courte pose (pour une valeur donnée des turbulences) des étoiles. A cause de la turbulence, on obtient une image de speckle dont l'intensité est de la forme $I(x, y) = I_1(x, y) + I_1(x - a, y)$ qui est la somme des intensités dues à chaque étoiles. a est le décalage entre les deux étoiles.
- On fait la transformée de Fourier des images obtenues, puis la moyenne de ces TF.
- On obtient alors une image avec des franges dont l'interfrange dépend de a . On en déduit a .
- La limite théorique de cette méthode est la limite de diffraction (critère de Rayleigh) du télescope.

5.2 Dans l'industrie : mesure de petits déplacements

Voir TP 05 de physique et TP MOS correspondant.

L'idée est de réaliser un interféromètre de Michelson, dont les miroirs sont remplacés par des objets diffusants : l'un servant de référence et l'autre étant l'objet à mesurer. On place une

caméra à la sortie de l'interféromètre, qui reçoit les interférences entre grains de speckle sur l'objet et sur la référence.

On étudie le changement de ces interférences lorsqu'on déplace ou déforme l'objet et on en déduit le déplacement ou la déformation. Les méthodes principalement utilisées sont la double exposition (qui remplace l'interférométrie holographique) et les images phasées.

Dans les deux cas, il faut que le déplacement ou la déformation soit inférieur à la taille d'un grain de speckle. En effet, il faut rester sur un même grain de speckle pour pouvoir comparer les phases avant et après déplacement car deux grains de speckle sont incohérents entre-eux.