

Optique et phénomène de moiré : Le moiré comme interféromètre graphique

Jean-Claude Pissondes

jcpissondes@aim.com

Adresse : EFREI, 30-32 Avenue de la République, 94800 Villejuif

RÉSUMÉ : Les figures de moiré offrent au regard des images très esthétiques mais aussi des animations très spectaculaires. Dans cette « Pommade¹ », on montre que le mécanisme du moiré constitue pour étudiants et enseignants un moyen simple mais efficace pour illustrer les caractéristiques des phénomènes périodiques, en particulier ceux associés à l'Optique ondulatoire. On mettra en évidence la simplicité des montages et des simulations visuellement très explicites où apparaît un moiré, dans des configurations statiques mais aussi dynamiques. Parmi l'ensemble de ses applications, on exposera la méthode du « moiré d'ombre » dans l'étude d'une surface en la comparant à l'analyse interférométrique d'un relief. Corrélation, modulation et repliement de spectre seront aussi évoqués.

Mots clés : moiré, interférences, « moiré d'ombre », analyse interférométrique, repliement de spectre.

1. INTRODUCTION

Ondes et corpuscules sont les deux grandes notions de la Physique. Elles sont introduites dès l'enseignement secondaire pour suivre étudiants et enseignants jusqu'aux niveaux les plus avancés. Les concepts nécessaires à la description des ondes se révèlent souvent difficiles à transmettre et nécessitent une très bonne adéquation entre définitions et illustrations visuelles.

Les signatures d'un comportement ondulatoire sont la diffraction et les interférences. Fondamentalement, ces deux manifestations convoquent la même opération simple : la *superposition*, traduite mathématiquement par une *sommation algébrique*. Pourtant, une mise en évidence maîtrisée du caractère ondulatoire de la lumière par ces phénomènes nécessite - surtout pour les interférences - des dispositifs astucieux aux réglages souvent délicats et, parfois, l'utilisation d'une lumière « extra-ordinaire », celle du laser. Enfin, notons que la simple *lecture* sur un graphe de la sommation algébrique de deux sinus déphasés *n'est visuellement pas directe* : elle nécessite un *calcul* puis un *nouveau tracé*.

2. MOIRÉ ET INTERFÉRENCES

2.1 Description et caractéristique essentielle

Un moiré est le nom donné au motif généralement bidimensionnel obtenu à partir de la superposition de deux ou plusieurs motifs périodiques (Figures 1 et 2).

Par construction, le moiré correspond à un processus de « superposition » qui *s'effectue sans calcul et par un montage expérimental très rudimentaire*. Mais l'une des principales caractéristiques [1] du moiré est qu'il est « macroscopique », c'est-à-dire *bien visible à l'œil nu*, alors que les motifs qui le génèrent peuvent être « microscopiques », c'est-à-dire *quasiment imperceptibles sans instrument* (Figure 2 en haut).

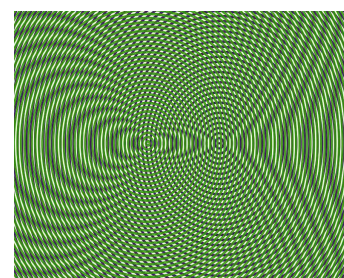
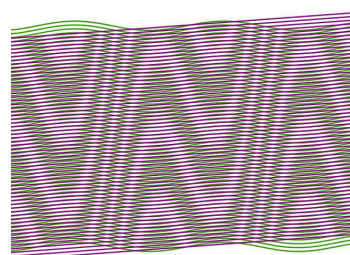


fig 1 : Exemples de franges de moiré



fig 2 : Le moiré au quotidien généré par des trames « microscopiques »

1. POsters, Maquettes, MATériels, DEMonstrations

2.2 Optique ondulatoire

L'Optique ondulatoire nous a habitués aux bénéfices qu'offre un tel mécanisme dans des processus de mesure et d'analyse : la simple lecture d'un déplacement bien visible de franges ou d'anneaux d'interférences donne accès à des longueurs et des variations souvent bien inférieures au micromètre. La Figure 3 montre, à droite, la mise en évidence par interférométrie de la non planéité d'une surface [2]. Au fond, un interféromètre réalise par son mécanisme même *ce que réalise graphiquement* le processus qui donne lieu au moiré : la superposition de deux ondes cohérentes conduit à une figure périodique qui porte les caractéristiques des ondes superposées et de leur situation relative. Une *modification macroscopique* de cette figure traduit un *changement de configuration inaccessible directement*.

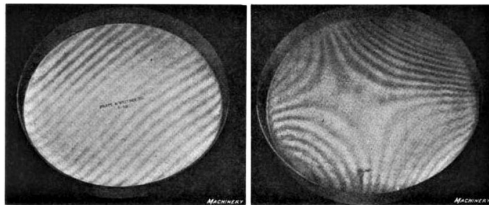


fig 3 : Contrôle interférométrique de planéité

3. OBJECTIFS

L'objectif de cette « Pommade » est double :

- Rappeler les mécanismes à l'œuvre dans l'obtention d'un moiré et montrer que celui-ci constitue une illustration graphique simple mais très explicite des phénomènes et applications typiques de l'Optique ondulatoire : interférences, battements, longueur de cohérence, analyse interférométrique de surface, holographie, etc. La problématique de l'échantillonnage et du repliement de spectre sera aussi évoquée (§ 9.2).

- Exposer les moyens d'analyse qu'offre ce phénomène associé à l'Optique. La plupart du temps, c'est dans l'étude de la topographie d'une surface matérielle qu'on l'utilise [3-6] : la superposition d'une trame témoin régulière et d'une trame de même pas qui épouse la surface d'étude, crée des *franges de moiré directement reliées au relief* de la surface (Figure 4). Sa visualisation est réalisée par « interférence » d'une *trame témoin plane* et d'une *trame altérée* porteuse des informations sur les écarts à la planéité. Un tel mécanisme s'apparente clairement à celui à l'œuvre dans l'analyse interférométrique d'une surface : *franges de moiré* et *franges d'égale épaisseur* correspondent, dans les deux cas, aux *courbes de niveau* du relief étudié. Cette méthode offre la possibilité de mettre en évidence *sans contact* les défauts, les aspérités et les déformations de la surface d'un miroir, d'une pièce mécanique quelconque ou même d'un système biologique.

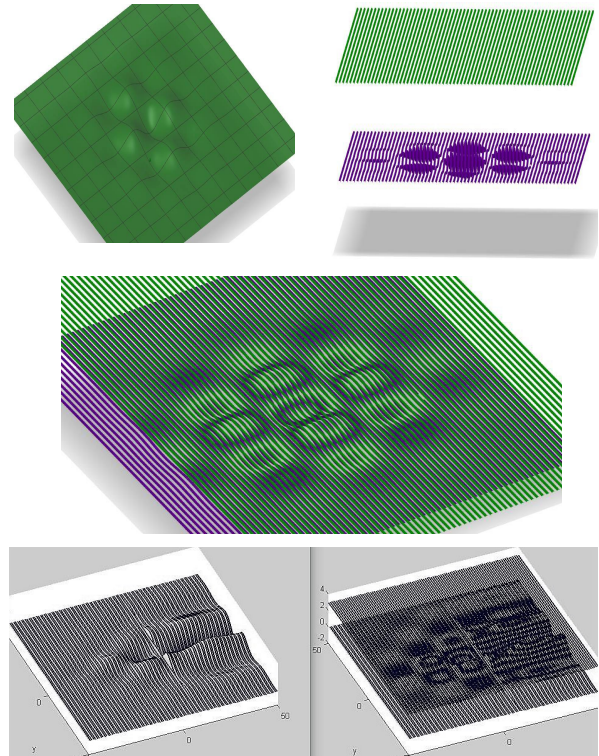


fig 4 : Trame témoin, sa projection et moiré résultant

4. PRINCIPE DU MOIRÉ

4.1 « Stroboscopie spatiale »

La superposition de deux trames périodiques ne donne *pas nécessairement* lieu à un moiré *observable*. Pour *voir* le moiré, les deux trames doivent avoir des caractéristiques et être dans des configurations particulières. Différences de périodicité et d'orientation ne doivent être ni trop faibles ni trop grandes. La Figure 5 montre, dans la configuration la plus simple, la « création » d'un moiré.

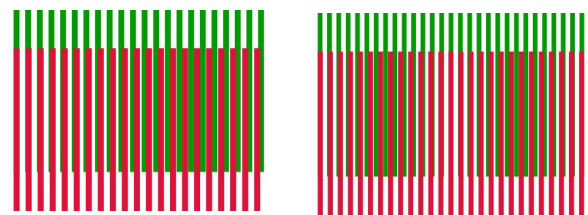


fig 5 : Formation d'une frange de moiré

Dans la première figure, une zone dense apparaît à l'endroit où les trames sont en « anti-coïncidence ». Mais le trop faible écart de périodicité entre les deux trames ne permet pas la présence d'une figure de moiré dans le champ couvert par celles-ci. Dans la seconde figure, un écart de périodicité légèrement supérieur induit l'apparition d'un moiré, d'une périodicité propre $\lambda_{\text{moiré}}$ nettement plus grande que celles des deux trames génératrices. La localisation des franges claires est ici associée à la condition de coïncidence

$$\lambda_{\text{moiré}} = n\lambda_1 = (n \pm 1)\lambda_2, \text{ avec } n \text{ entier.}$$

Au delà d'un certain écart de périodicité, seul le réseau dont la périodicité est la plus faible est visible.

Pour clore ce trop court paragraphe sur les conditions d'apparition d'un moiré, on renvoie le lecteur au § 9.2 qui concerne le sous-échantillonnage, le repliement de spectre et le tramage d'une image.

4.2 « Longueur d'onde » du moiré

La superposition de deux trames périodiques génère donc une trame périodique. Sa périodicité $\lambda_{\text{moiré}}$ dépend de plusieurs facteurs : la périodicité des trames superposées et leur positionnement relatif. On distingue deux situations canoniques simples : deux trames parallèles aux périodicités différentes et deux trames de même périodicité différemment orientées (Figure 6).

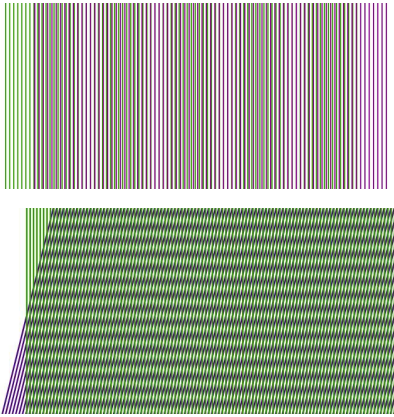


fig 6 : Moiré à deux réseaux de droites

Pour les deux situations, des considérations géométriques conduisent respectivement aux formules suivantes :

$$\lambda_{\text{moiré}} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$$

et

$$\lambda_{\text{moiré}} = \lambda / 2 \sin(\alpha/2) \approx \lambda / \alpha.$$

où α est l'angle entre les réseaux de franges, considéré comme petit devant $\pi/2$.

5. QUELQUES FORMULES

Une trame périodique correspond à une surface générée par la répétition d'un élément géométrique. Son profil est la densité ρ déterminée par la donnée d'une fonction φ de deux variables et d'une fonction périodique f_λ :

$$\rho(x, y) = f_\lambda \circ \varphi = f(2\pi\varphi/\lambda).$$

Lors de la superposition de deux trames, des zones plus ou moins opaques se superposent et génèrent en chaque point une zone plus ou moins opaque de façon analogue à un problème de transmittance. La densité

donnant le profil du moiré s'obtient donc à partir du produit des densités des trames :

$$\rho(x, y) = \rho_1(x, y)\rho_2(x, y) = \dots + A \cos[2\pi(\varphi/\lambda_1 - \psi/\lambda_2)].$$

Le dernier terme obtenu par ce calcul correspond au terme d'interférences du moiré.

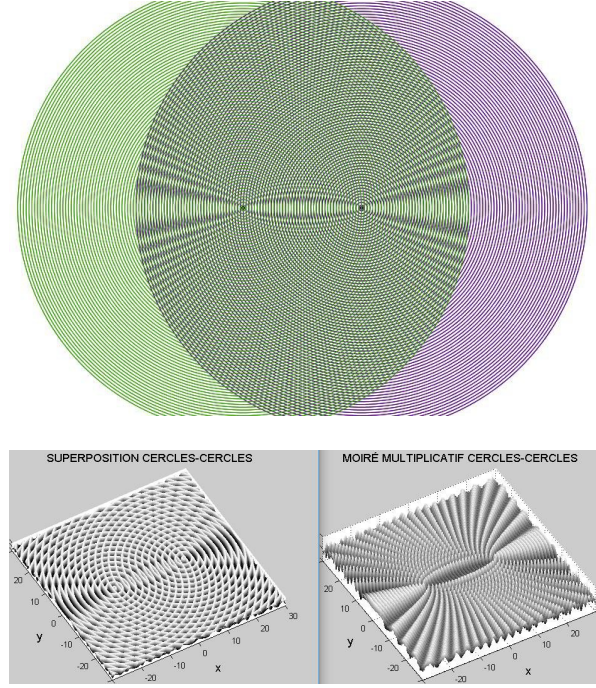


fig 7 : Moiré « cercles-cercles » réel et calculé

La Figure 7 montre le moiré généré par la superposition de deux trames formées par des cercles concentriques. Dans la dernière figure en bas à droite, cette superposition est reproduite à partir de la formule donnant la densité du moiré. Les arcs d'hyperbole observés dans les superpositions y apparaissent clairement.

Une précision importante doit être apportée : toutes les figures de moiré présentées dans cet article sont « réelles ». Elles résultent bien d'une *superposition réelle* de deux trames, que ces trames soient générées par un programme (Matlab ou GeoGebra) ou qu'elles correspondent à un objet matériel (rhodoïd trame ou fils parallèles tendus et leur ombre). Seule la figure en bas à droite de la Figure 7 *résulte d'un calcul*.

6. TRAME DÉFORMÉE

Imaginons à présent que les trames superposées ne diffèrent que par la présence de légères perturbations présentes dans l'une des deux. On dispose alors d'une trame témoin jouant le rôle d'étalon et d'une réplique ayant subi des modifications locales dues à une perturbation physique de plusieurs natures : elle peut être mécanique, thermique ou résulter de « défauts » dans la fabrication même de la surface. Dans ce cas, le moiré résultant de leur superposition doit porter la trace de ces perturbations. En réalité, on constate et on montre

que les modifications se trouvent *soulignées par le moiré* et donc visuellement bien mises en évidence (Figure 8). On retiendra donc le fait important suivant : par le caractère *amplificateur* du moiré, la *perturbation* en jeu peut être *infinitésimale* (très petite par rapport aux dimensions caractéristiques de la surface) et être *rendue visible par le moiré* [1].

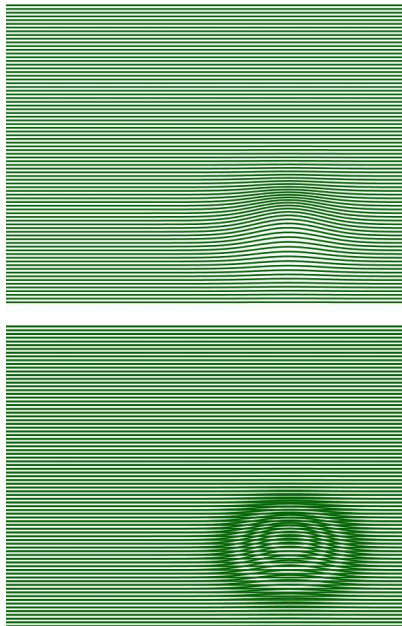


fig 8 : Trame déformée vue sans et avec moiré

La figure précédente montre le processus de l'obtention du moiré révélant le relief d'une surface. Une trame de pas donné a été « imprimée » sur la surface à analyser. Une trame témoin de même pas est placée au dessus de la surface tramée. Il suffit d'observer la trame témoin au dessus de la surface tramée pour voir apparaître le moiré révélant de façon nette la topographie de la surface. Insistons encore sur le fait que les parties en relief *très peu visibles* sur la surface nue ou même tramée sont *clairement révélées* au sein du moiré qui les accentue.

7. TRAME TÉMOIN, TRAME PROJÉTÉE

7.1 On projette

Les considérations du paragraphe précédent donnent lieu à la technique du « moiré d'ombre » [3-6]. Une trame régulière est projetée par un faisceau lumineux sur la surface à analyser. Se forme alors sur celle-ci l'ombre de la trame qui épouse la topographie de la surface. La superposition visuelle de la trame et de son ombre génère un moiré qui porte les caractéristiques topographiques de la surface.

Les montages numériques de la Figure 9 suivent le principe évoqué en introduction et par la Figure 4. Ici, la trame est projetée sur deux surfaces planes, une surface parabolique et un paraboloïde hyperbolique. Les moirés obtenus portent la marque des différentes

topographies : pente des deux plans, cercles concentriques et arcs d'hyperbole.

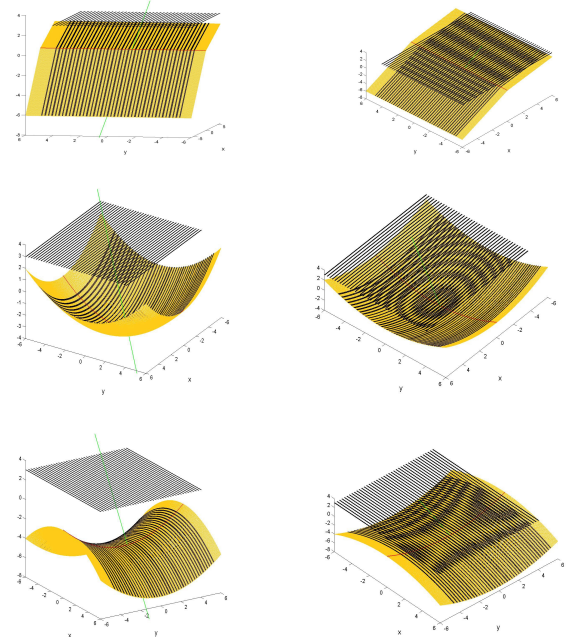


fig 9 : Trame témoin, son ombre et moiré résultant

7.2 Montage du moiré d'ombre

Les clichés Figure 10 correspondent à un montage rudimentaire mais bien explicite du moiré d'ombre. La lumière d'un vidéoprojecteur projette sur une surface (plans inclinés, ballons, surface « gauche ») l'ombre d'une trame imprimée sur un rhodoïd ou constituée par des fils de laine parallèles tendus sur un cadre. La superposition visuelle de la trame et de son ombre projetée crée les moirés que l'on voit sur les clichés.

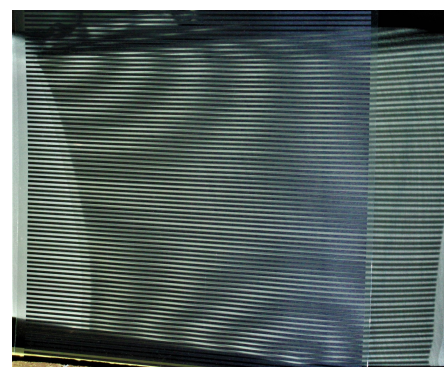
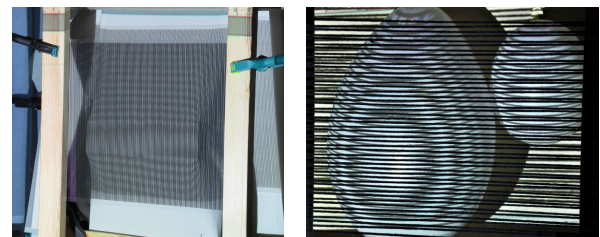


fig 10 : Montage réel du moiré d'ombre

Dans le premier cas, le montage, volontairement simple et rustique, donne lieu à une observation bien claire : le moiré est constitué de franges rectilignes parallèles séparées par une distance reliée à la pente des surfaces planes sur lesquelles l'ombre de la trame est projetée. Dans le deuxième cas, le moiré correspond aux courbes fermées ovales associées à une « altitude » à la surface des deux ballons. Dans le troisième cas, les courbes constituant le moiré sont ouvertes : ce sont des arcs d'hyperbole épousant le relief du tissu tendu sur son cadre tordu pour former une surface à courbure négative de type « selle de cheval ». Ces observations corroborent ce que montrent les moirés numériques de la Figure 9.

7.3 Courbes de niveau

Les figures de moiré obtenues ci-dessus dépendent de plusieurs paramètres : la surface de projection bien sûr, mais aussi la position de la source de lumière, la divergence de ses rayons et la position de l'observateur (distance et orientation). Dans une configuration particulière, on montre que les *franges de moiré* sont les *courbes de niveau* de la surface sur laquelle la trame de pas p a été projetée. Les figures ci-dessous (Figure 11) montrent, pour différentes surfaces vues en coupe, le processus d'apparition des franges après projection de l'ombre de la trame (grille). Dans la première configuration, source et observateur sont à distance finie, à distance infinie pour les deux suivantes. Dans tous les cas, le dispositif est configuré de sorte que *chaque frange* suive une *altitude donnée* et que les *interfranges* correspondent à une *même différence d'altitude*.

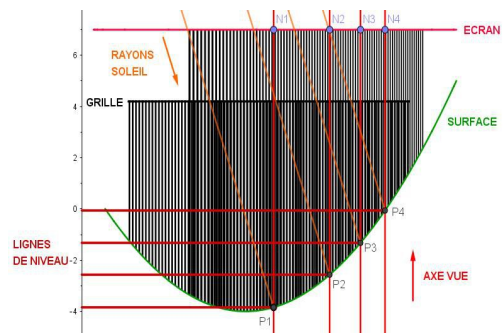
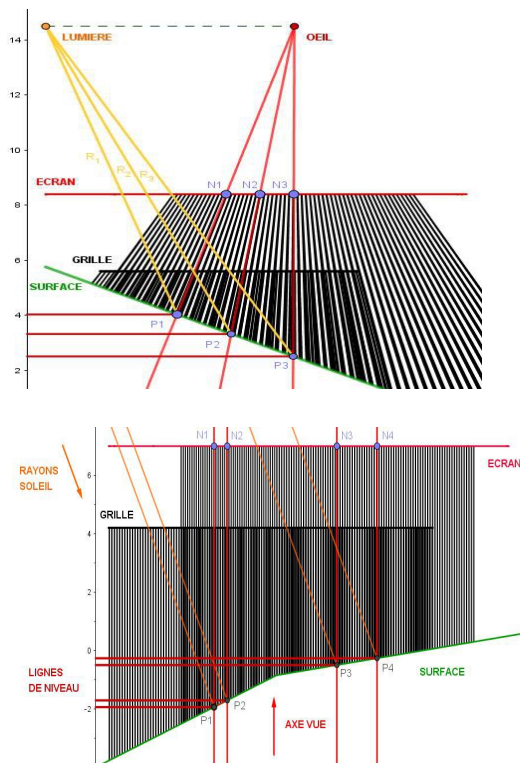


fig 11 : Franges de moiré et lignes de niveau

7.4 Franges et relief

Si les conditions associées aux courbes de niveau sont satisfaites, l'analyse des franges permet de remonter au relief de la surface grâce à des coupes successives. Un numéro de frange correspond alors à une altitude donnée :

$$H = Np f(\text{géométrie}) \approx \text{Cst } Np .$$

Les figures suivantes (Figure 12) montrent le schéma de reconstruction des profils des différentes coupes de la surface étudiée. La *concavité* de la surface est donnée par le *mouvement des franges* produit lorsque l'on approche ou éloigne la trame de la surface.

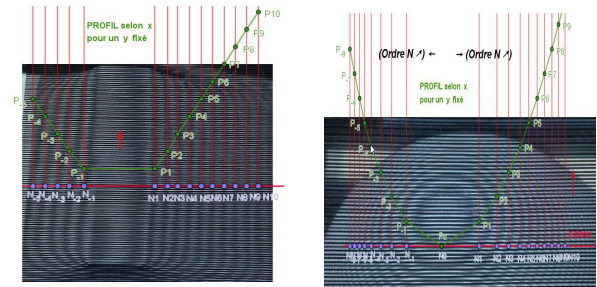


fig 12 : Reconstruction des profils

8. MOIRÉ ET MOUVEMENT

Une utilisation visuellement spectaculaire du moiré consiste à créer la *simulation du mouvement* d'une figure dans le plan.

Une figure F donnée (forme géométrique, animal, danseuse, etc.) est reproduite en plusieurs endroits du plan. Chacune de ces positions F_k correspondra à une position de F lors de son « mouvement ». On construit une trame régulière T faite de bandes opaques verticales séparées par des ajouements. Classiquement, la largeur Δ des bandes opaques de T est égale à un nombre entier de fois la largeur δt des ajouements : $\Delta = n\delta t$. On évide ensuite les différents motifs F_k correspondant aux duplications de F de la façon suivante. On place la trame T sur F_1 puis on rend

transparentes les parties où les bandes opaques de T se trouvent. Ne restent plus, dans F_1 , que des segments verticaux de largeur δt séparés d'une distance $\Delta = n\delta t$. On déplace ensuite T dans la direction orthogonale aux bandes sur la distance δt . On réitère l'opération sur la figure F_2 la plus proche. On déplace à nouveau T de δt et on évide la figure F_3 qui suit F_2 . On réitère l'opération jusqu'à la dernière figure F_{n+1} . La simulation du mouvement consiste alors à *déplacer la trame T* sur la feuille où se trouvent les figures F_k évidées dans une direction orthogonale aux bandes. Par le jeu des *caches successifs* des figures décalées, la figure unique F semble se mouvoir dans le plan. En effet, la trame T masque toutes les figures F_k dont les bandes opaques sont dans l'intervalle des bandes opaques de T . Seule est visible la duplication F_k dont les bandes opaques coïncident avec les interstices de la trame T . À chaque déplacement élémentaire δt de T , la figure F_k visible change, créant l'impression que la figure F s'est déplacée. Bien entendu, sa vitesse de déplacement, son sens comme son intensité, dépendent de la vitesse de déplacement de la trame T mais aussi de l'incrément utilisé lors de l'opération d'ajoutement de toutes les duplications F_k .

Dans la Figure 13, on présente les 8 positions successives d'un rectangle (la figure F) lors du déplacement horizontal de la trame T . Le rectangle semble alors effectuer un mouvement circulaire dans le sens des aiguilles d'une montre.

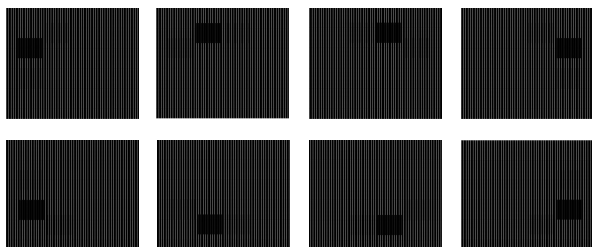


fig 13 : Simulation d'un mouvement circulaire

9. COMPLÉMENTS

Cette toute dernière partie est consacrée à l'évocation de deux sujets importants : la corrélation et l'étude spectrale du moiré.

9.1 Moiré et corrélation

Si l'on étudie la superposition de motifs caractérisés par la répartition aléatoire de points ou de lignes tout en présentant quelques éléments de régularité, on obtient alors un moiré dit stochastique [7-8]. Comme le moiré « déterministe », il porte les caractéristiques des motifs superposés et de leur position relative.

En particulier, l'image de la répartition plus ou moins aléatoire d'objets ayant évolué dans le temps, superposée à l'image de cette même répartition vue plus

tôt, donne lieu à un moiré qui caractérise l'évolution supposée [8].

La fonction de corrélation est l'un des outils essentiels à l'étude des signaux et des « images », déterministes ou stochastiques. Or, le moiré que l'on perçoit de façon effective est la *traduction graphique* de l'intercorrélation des deux motifs superposés [1, 8-9]. Sans du tout rentrer dans les détails de sa formalisation, illustrons de façon simple le rapport entre corrélation et moiré par la comparaison des deux séries de figures qui suivent.

Figure 14 sont tracés les graphes bien connus de l'autocorrélation d'un signal purement périodique, puis de signaux dont le motif de base se répète de façon de plus en plus aléatoire. Comme on s'y attend, l'autocorrélation passe d'une figure périodique à une figure de plus en plus piquée en 0.

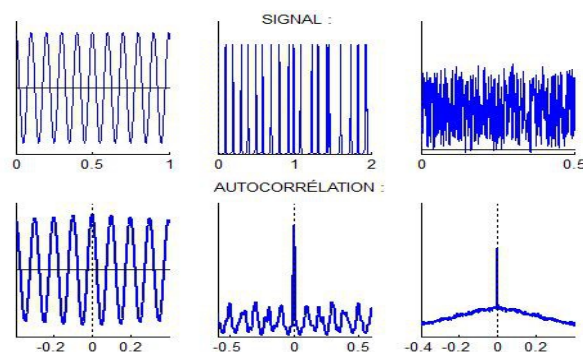


fig 14 : Signal et autocorrélation

Figure 15 sont présentées les figures de moiré générées par la superposition de deux trames identiques tournées d'un certain angle, où chaque trame est composée de lignes parallèles séparées par des distances plus ou moins fluctuantes [7].

Les figures de moiré qui en résultent suivent la même évolution que les figures d'autocorrélation précédentes : on passe d'un moiré purement périodique à des moirés dont la frange centrale prédomine de plus en plus par rapport aux franges latérales.

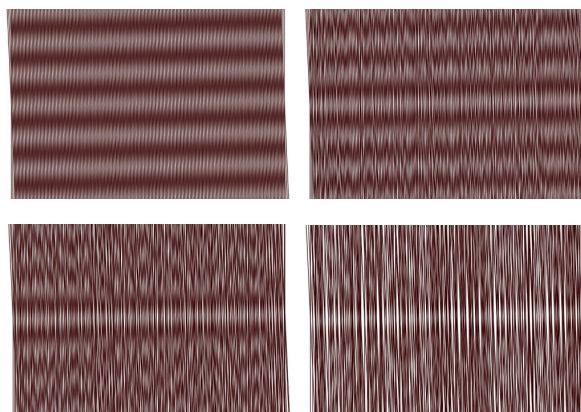


fig 15 : Moiré de trames aléatoires

9.2 Réduction et repliement de spectre

Enfin, terminons par ce par quoi on aurait pu introduire notre sujet : l'apparition d'un moiré du fait d'un sous-échantillonnage ou d'un tramage.

La première situation nous conduit à la notion de « repliement de spectre ». La Figure 16 montre une image composée de plusieurs motifs comprenant des périodicités diverses et très différentes en grandeur et en direction. La Figure 17 donne le spectre d'amplitude de cette image dont les fréquences significatives sont à l'intérieur du cercle rouge.

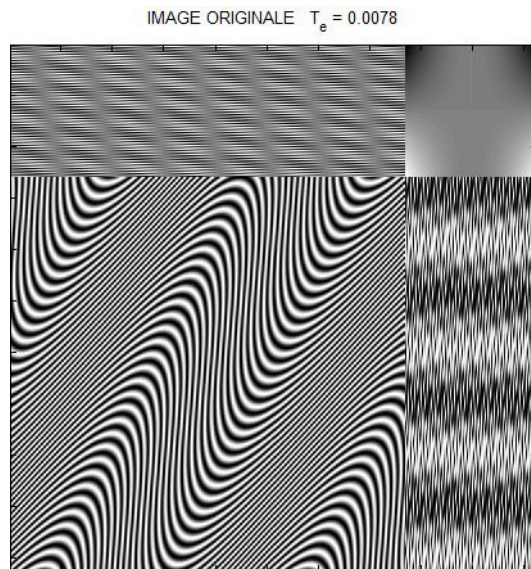


fig 16 : Image comprenant plusieurs périodicités

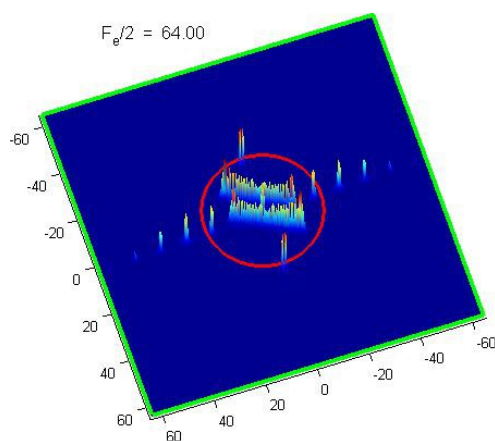


fig 17 : Spectre d'amplitude de l'Image

La Figure 18 résulte d'une « réduction » de l'image précédente où l'échantillon 7 a été collé à l'échantillon 1, l'échantillon 13 à l'échantillon 7, etc. La fréquence d'échantillonnage est donc divisée par 6. Comme on s'y attend, la figure qui en résulte présente des périodicités absentes de l'image originale.

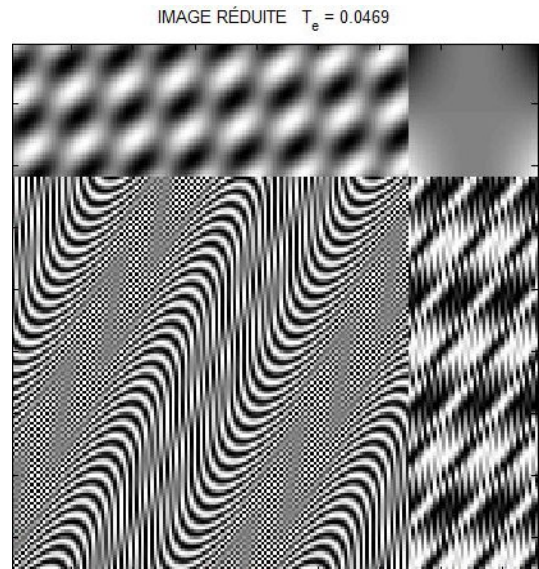


fig 18 : Image réduite

Le spectre d'amplitude de l'image réduite (Figure 19) traduit clairement le phénomène de repliement - de « recouvrement » - puisque certaines fréquences des différentes duplications du motif spectral original viennent s'immiscer dans le cercle des fréquences du spectre de base. Le critère de Shannon n'est alors plus satisfait et l'image originale s'enrichit de nouveaux motifs là où les fréquences spatiales sont grandes. En haut à droite de l'image où elles sont très faibles, aucun changement n'apparaît.

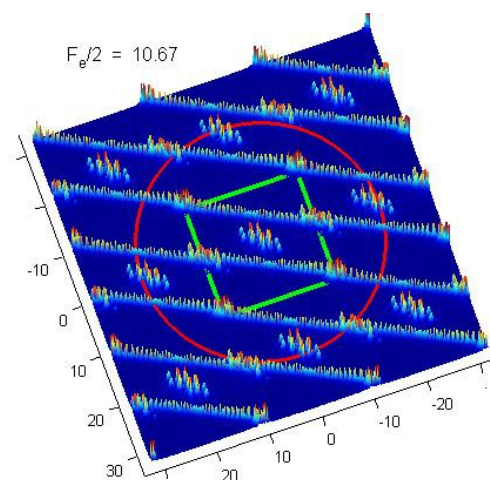


fig 19 : Spectre d'amplitude de l'Image réduite

9.3 Modulation et dédoublement du spectre

La Figure 20 montre cette fois-ci notre image originale (Figure 16) tramée par une suite de bandes parallèles obliques très serrées mais bien visibles (voir en haut à droite). L'image qui en résulte présente à certains endroits - en particulier dans le grand carré - des motifs très différents des motifs originaux.

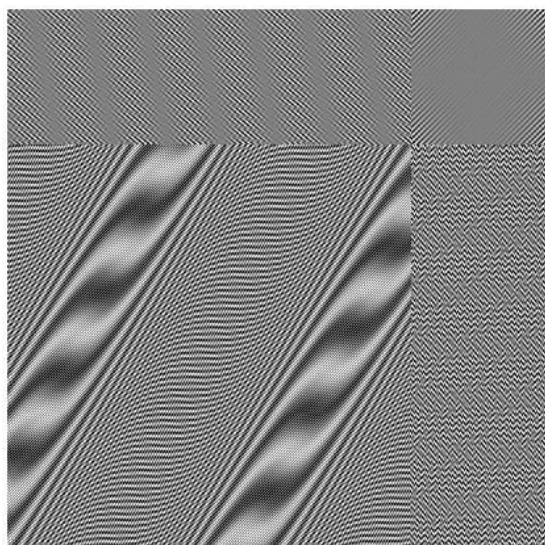


fig 20 : Image tramée

Le spectre d'amplitude associé (Figure 21) correspond alors au spectre original dédoublé par le processus de modulation.

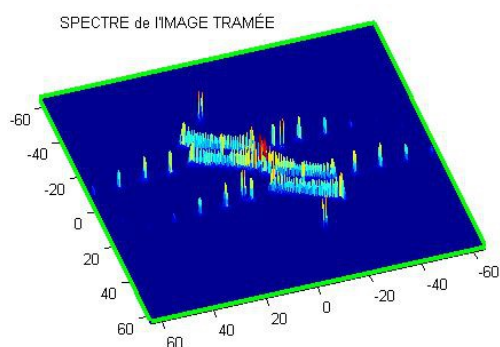


fig 21 : Spectre d'amplitude de l'Image tramée

10. CONCLUSION : LE MOIRÉ COMME PASSERELLE

Ce travail a été présenté aux congrès Optique Toulouse 2018, Optique Dijon 2021 et au Cetsis Valenciennes 2021 [10-12].



fig 22 : Montage du moiré d'ombre présenté en public

Dans toutes les situations, l'observation de la formation d'une figure de moiré, qu'elle corresponde à une superposition accidentelle de réseaux (rideaux, tissus,

grillages, etc.), à un montage expérimental bien réfléchi ou à la superposition de deux trames numériques, est presque toujours source d'étonnement voire d'émerveillement.

De toute évidence, ces images séduisent et attirent l'œil. Est-ce un mal ? Certainement pas.

On constate en effet que les images présentées ici, comme d'autres plus variées et plus complexes, ont un impact visuel fort qui conduit très vite le spectateur - étudiant et enseignant - à s'interroger sur le comment et le pourquoi de leur formation.

On dispose donc d'un outil très attractif, mais aussi très riche, qui offre de multiples prétextes à la présentation et l'étude de sujets certainement plus austères comme l'arithmétique, la géométrie dans l'espace, l'Optique ondulatoire, la corrélation, l'échantillonnage et les effets de repliement de spectre.

De façon générale, le recours aux phénomènes de moiré s'adresse aux élèves et étudiants qui, dès les classes de Première et Terminale en lycée, doivent réfléchir aux phénomènes périodiques, à leur manifestation et à leur utilisation en Optique ondulatoire, en acoustique et, plus tard dans leurs études, en traitement du signal. À l'égard de tous ces thèmes, le mécanisme de moiré fait office de passerelle.

Les « travaux personnels encadrés » et autres projets tuteurés dont il peut faire l'objet, mettent en jeu observations qualitatives, prévisions par le calcul et réalisations expérimentales. Il concerne aussi les enseignants qui disposent par ces illustrations de moyens visuellement simples et convaincants pour éclairer les notions rencontrées dans ces disciplines.

Remerciements

L'auteur remercie les experts du comité Cetsis pour leur lecture attentive du présent article et leurs commentaires, ainsi que les organisateurs des congrès Optique Toulouse 2018, Optique Dijon 2021 et du Cetsis Valenciennes 2021.

Bibliographie

- [1] Jacques Harthong, "Le Moiré", *Advances in applied mathematics* 2, 24-75, 1981.
- [2] "Flatness testing", tiré de https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_flat.
- [3] J-P. Collet, J. Marasco et L. Pflug, "Le moiré d'ombre : une méthode expérimentale et ses possibilités", *Bulletin technique de la Suisse romande*, 179-187, 1974.
- [4] C. Brèque et F. Brémand, "Modélisation de forme 3D par méthode de moiré de projection et analyse par décalage de phases", tiré de www.researchgate.net/publication/268361338.

- [5] H. Takasaki, "Moiré Topography", *Applied Optics*, Vol. 9, No. 6, June 1970.
- [6] K. Creath et J.C. Wyant, "Moiré and Fringe Projection Techniques", *tiré de* www.researchgate.net/publication/238546356, January 1995.
- [7] I. Amidror, "Glass patterns in the superposition of random line gratings", *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics* 5, 205-215, 2003.
- [8] M. A. Z. García, D. C. Méndez et M. Lehman, "Some properties and applications of the moiré effect obtained with dots distributions", *Magnum Conference of Computing*, 2007.
- [9] O. Kafri et I. Glatt, "The Physics of Moiré Metrology", *tiré de* www.researchgate.net/publication/37406594, January 1990.
- [10] J-C P., "Optique et phénomène de moiré : le moiré comme interféromètre graphique", *Optique Toulouse 2018, Université Toulouse III - Paul Sabatier, du 03 au 06 juillet 2018*.
- [11] J-C P., "Optique et phénomène de moiré : le moiré comme interféromètre graphique", *CETIS Valenciennes 2021, Université Polytechnique Hauts-de-France, du 08 au 10 juin 2021*.
- [12] J-C P., "Le moiré : des interférences sans ondes, sans calcul, sans simulation", *Optique Dijon 2021, Université Bourgogne Franche-Comté, du 05 au 09 juillet 2021*.