

Le dispositif expérimental.

APPLICATION DE LA MÉTHODE DU MOIRÉ A LA MESURE DES DÉFORMATIONS SUR LE MATÉRIAU BOIS

par Ch. SALES,
*Ingénieur de Recherches
au Centre Technique Forestier Tropical.*

SUMMARY

THE APPLICATION OF THE MOIRÉ METHOD TO THE MEASUREMENT OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS IN WOOD

The moiré technique makes use of the properties of mechanical interference between two systems of very fine pitch. It makes it possible to measure elastic and plastic displacements and deformations at any point on the surface of the backing material.

This article is a first approach to the use of the moiré technique for assessing displacements and deformations in wood elements and the method has been applied to the analysis of glued laminated structures. It allows of the measurement of large displacements and limit phenomena of a discontinuous nature, such as glued joints in this type of material.

RESUMEN

APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL MOIRÉ PARA LA MEDICIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS Y DE LAS DEFORMACIONES DE LA MADERA

La técnica del moiré es un procedimiento por el cual se aprovechan las propiedades de las interferencias mecánicas entre dos redes de paso sumamente fino y permite la medición de los desplazamientos y el cálculo de las deformaciones del material de soporte, tanto en las áreas elásticas como plásticas, y ello en cualquier punto de la superficie considerada.

Este estudio constituye un planteamiento preliminar en la utilización de la técnica del moiré para la apreciación de los desplazamientos y deformaciones en elementos de madera y ha sido aplicado para el análisis de las estructuras laminadas encoladas. Efectivamente, el procedimiento permite la medición de grandes desplazamientos y de los fenómenos límites, con carácter de discontinuidad, como por ejemplo, las juntas de cola de este tipo de material.

INTRODUCTION

La technique du Moiré est un procédé utilisant les propriétés des interférences mécaniques entre deux réseaux de traits d'un pas très fin. Elle permet de visualiser et de mesurer les déplacements puis les déformations aussi bien dans les domaines

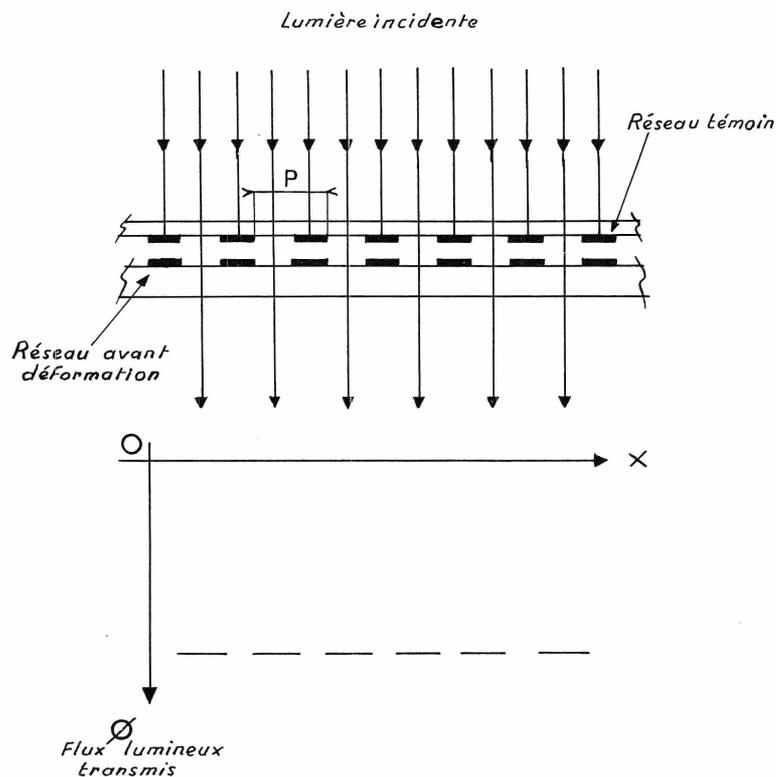
élastiques que plastiques moyennant un traitement mathématique des données.

L'application de la méthode à l'analyse des contraintes permet de déterminer expérimentalement et en tout point les composantes du déplacement ainsi que celles des déformations d'une pièce soumise à un champ de contrainte quelconque.

Le principe de la méthode est basé sur la comparaison entre un réseau déformé et un réseau non déformé jouant le rôle d'étalon de mesure. Chaque réseau est constitué d'une grille composée d'un très grand nombre de traits par millimètre, dont le nombre varie généralement entre 10 et 50 traits/mm.

Cette méthode présente de très nombreux avantages par rapport aux techniques de mesure couramment utilisées. En particulier, elle permet la mesure des déformations en tout point, d'une surface pouvant être relativement importante. Elle visualise les phénomènes et offre à l'utilisateur la possibilité d'obtenir une « carte des déformations » en écartant toute notion de mesure aveugle localisée en un endroit précis de la structure à étudier. Enfin, elle permet la mesure de grands déplacements et des phénomènes limites à caractères de discontinuité tels que les joints de colle d'une structure lamellée-collée.

Fig. 1



PRINCIPE DE LA MÉTHODE

THÉORIE

Mise en œuvre d'un système de franges.

Considérons un premier réseau solidaire de la surface de la structure à étudier sur lequel on applique un réseau témoin maintenu au contact du premier, mais mécaniquement indépendant de ce dernier.

Toute déformation de la structure entraînera une déformation du premier réseau tandis que le témoin totalement indépendant jouera le rôle d'étalon.

Supposons, de façon à simplifier le problème, que le pas des deux réseaux soit identique. Si au départ leurs lignes coïncident parfaitement, on peut observer par transmission ou réflexion le maximum de lumière (fig. 1). Quand le modèle est soumis à un champ de contrainte, le premier réseau se déforme et ses lignes ne coïncident plus parfaitement avec celles du réseau mère. On observe alors l'apparition d'un système de franges selon le principe indiqué sur le schéma (fig. 2).

Ainsi, en chaque point du modèle, la déformation se calcule en mesurant les distances entre deux franges consécutives et en divisant le pas du réseau par cette distance. La déformation est alors donnée par la relation suivante :

$$E_x = \frac{P}{f_x}$$

où P est le pas du réseau,
 f_x est la distance entre 2 franges.

Influence du décalage angulaire.

La superposition de deux réseaux identiques avec un léger décalage angulaire fait apparaître des franges sombres et claires successives perpendiculaires à la direction plus ou moins commune des 2 réseaux superposés.

Soit θ l'angle formé par les deux réseaux :

Considérons un losange du type 1 constitué par l'intersection de 2 intervalles transparents de largeur $P/2$ ou par l'intersection de 2 traits noirs.

Le long de la plus petite diagonale d'une série alignée de ces losanges, on observe une succession de plages totalement claires de largeur P ou totalement noires de même largeur.

Considérons maintenant les losanges du type 2, résultant de l'intersection d'un intervalle transparent et d'un trait noir. Le long de la plus petite diagonale d'une série de ces losanges, on observe une succession de plages toutes noires. Entre une diagonale de type 1 et une diagonale de type 2, le pourcentage de zone transparente diminue progressivement. Les diagonales de type 1 forment des franges claires et celles de type 2, les franges noires. Ces franges sont orientées selon la seconde bissectrice de l'angle formé par la direction des 2 réseaux, ce qui correspond approximativement à une direction perpendiculaire aux axes des deux réseaux qui coïncident quasiment.

La distance entre une frange blanche et une frange noire successive est alors de

$$\frac{P/2}{\sin \theta}$$

θ étant petit, il est légitime d'assimiler les sinus à

Fig.2

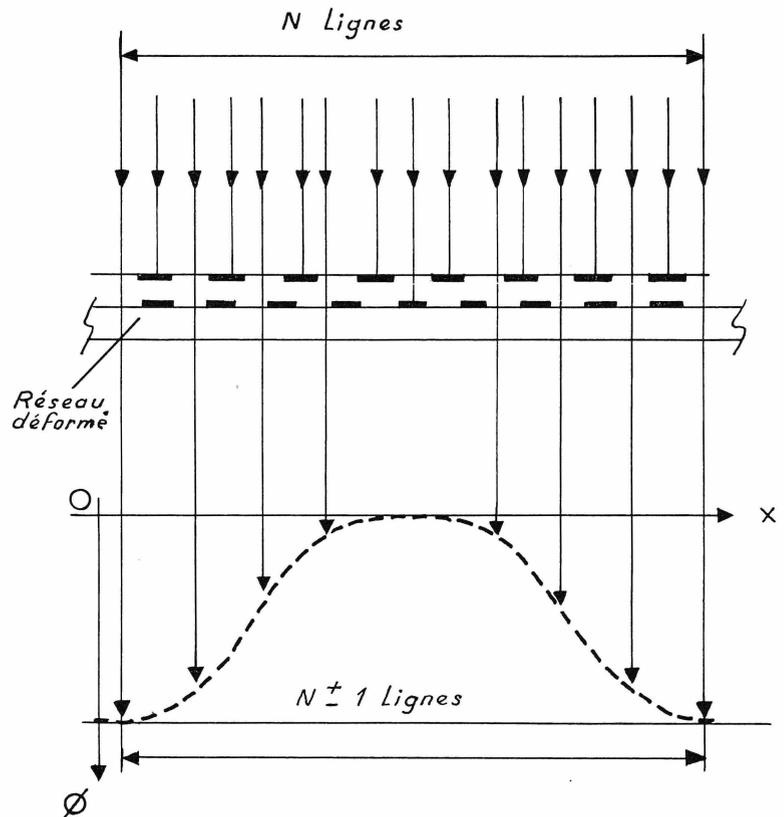
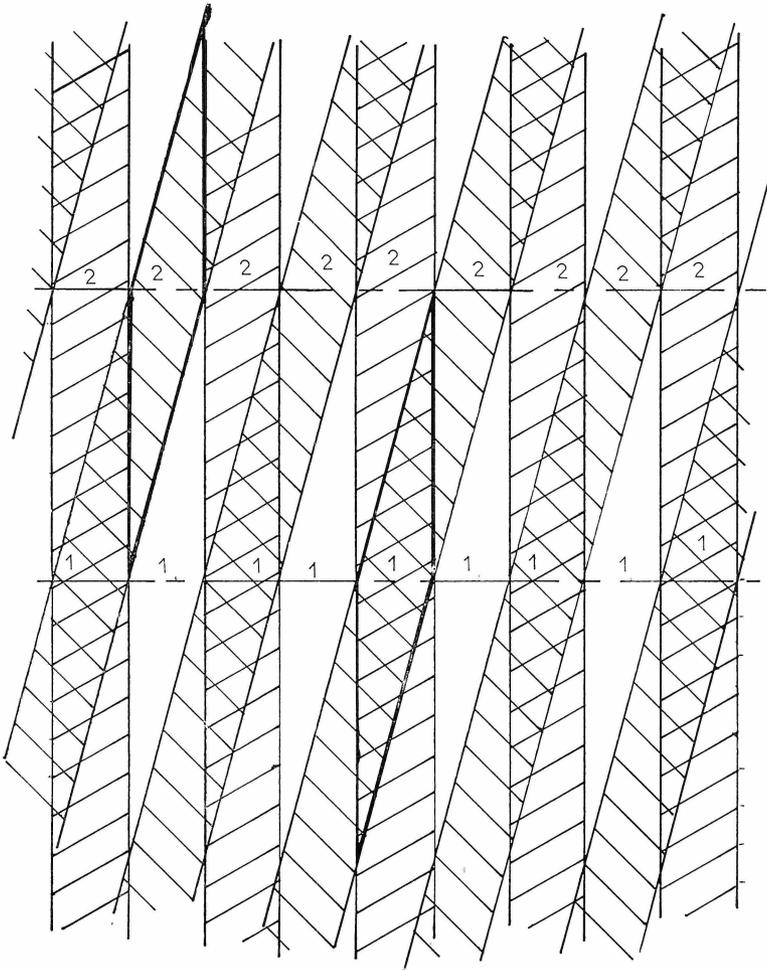


Fig. n° 2 bis



l'angle et l'on peut alors conclure que la distance entre deux franges successives est inversement proportionnelle à l'angle de rotation des deux réseaux :

$$f = P/\theta .$$

ÉTUDE MATHÉMATIQUE

Equations générales des faisceaux de franges.

Considérons, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la superposition d'un réseau témoin de pas p et d'un réseau déformé « légèrement décalé » d'une valeur de pas λ et d'un angle de rotation θ donc de pas :

$$p' = p(1 + \lambda) .$$

Il est alors possible d'établir une représentation analytique des familles de droites constituant les deux réseaux (voir fig. 2 bis). Les axes, choisis par convention, seront les suivants :

— axe Oy coïncidant avec l'axe d'un trait noir du réseau témoin,

— axe Ox , perpendiculaire à Oy , et passant par l'intermédiaire de Oy avec l'axe d'un trait noir du réseau déformé.

Par convention, Oy sera le trait d'ordre $K = 0$ pour le réseau témoin dont l'équation générale des lignes le constituant sera :

$$x = Kp . \quad (1)$$

Les équations des droites du faisceau définissant le réseau déformé se calculent de la manière suivante :

Il s'agit de droites de la forme $y = ax + b$, avec

$$y = \operatorname{tg}(\pi/2 - \theta) x + b = \operatorname{Cotg} \theta . x + b$$

et

$$b = -l . P(1 + \lambda) / \sin \theta$$

d'où

$$y = \frac{\cos \theta}{\sin \theta} x - \frac{P(1 + \lambda)}{\sin \theta} l$$

et

$$y \sin \theta = \cos \theta . x - p(1 + \lambda) l .$$

La constante $l \in N$ définit le trait d'ordre du réseau. Ainsi, $l = 0$ pour le trait d'ordre 0, 1 pour le trait d'ordre 1 et ainsi de suite.

En outre, si la rotation du réseau se fait dans le sens négatif, θ devient $-\theta$ et l'on a alors :

$$y \sin(-\theta) = \cos(-\theta) \times x - p(1 + \lambda) l$$

d'où :

$$-y \sin \theta = x . \cos \theta - p(1 + \lambda) l$$

$$\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{1 + \lambda} = pl . \quad (2)$$

Les franges claires du Moiré (plus petites diagonales des losanges définis précédemment) correspondent à la relation :

$$m = k - l = \text{Cte} , \quad (3)$$

la frange passant par 0 correspondant à $k - l = 0$, avec $m \in N$.

De la combinaison des équations (1), (2) et (3), il vient :

$$x/p - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{(1 + \lambda) p} = m .$$

L'équation des droites parallèles représentant les axes des franges claires de Moiré est donc :

$$x - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{1 + \lambda} = mp . \quad (4)$$

Interfrange mesurée suivant l'axe Ox :

Intersection de $y = 0$ avec frange d'ordre 1

$$x(1 + \lambda) - x \cos \theta = p(1 + \lambda)$$

$$x = \frac{P(1 + \lambda)}{1 + \lambda - \cos \theta}.$$

λ et θ sont petits, d'où :

$$1 - \cos \theta \simeq \theta^2/2$$

qui est un infiniment petit du second ordre et

$$f_x \simeq \frac{e}{|\lambda|}; \quad (5)$$

de la même manière on a :

$$f_y \simeq \frac{e}{|\theta|} \quad (6)$$

et la distance f entre 2 franges sera :

$$f = \frac{p}{\sqrt{\lambda^2 + \theta^2}}.$$

Propriétés des faisceaux de franges.

Le réseau déformé subit une déformation par rapport au réseau témoin pouvant se représenter par le produit de deux transformations géométriques simples :

— une affinité d'axe Oy et de rapport $1 + \lambda$ suivie d'une rotation de centre O et d'angle θ .

Le produit de 2 applications n'est pas bijectif et donc leur ordre d'application ne peut être inversé.

Un point M appartenant au matériau et donc lié au réseau déformé, de coordonnées (x, y) et ayant pour représentation complexe $z = x + iy$, se déduira dans la rotation de centre O et d'angle θ d'un point M' de coordonnées (x', y') selon la relation :

$$z' = x' + iy' = (\cos \theta - i \sin \theta) z$$

d'où, en identifiant terme à terme :

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' &= y \cos \theta - x \sin \theta. \end{aligned}$$

Ce point M' provient lui-même d'un point $M''(x'', y'')$ par l'affinité d'axe Oy .

On a :

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{x'}{1 + \lambda} \\ y'' &= y'. \end{aligned}$$

D'où :

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{1 + \lambda} \\ y'' &= y \cos \theta - x \sin \theta. \end{aligned}$$

Or, les franges de Moiré sont justement définies par la relation (4) :

$$\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{1 + \lambda} = x - mp$$

cela signifie que tout point M d'une frange d'ordre m provient d'un point M'' tel que le **déplacement selon Ox** de ce point, dans la transformation du réseau, soit constant et égal à mp .

La frange d'ordre m du Moiré est le lieu des points pour lequel la **composante de déplacement perpendiculaire à la direction initiale du réseau** est constante dans la déformation du réseau et égale à pm .

Etude des déformations.

Cette propriété très importante des réseaux à traits parallèles est utilisée dans l'étude des déformations.

Si nous désignons par

$$\begin{cases} u(x, y) \\ v(x, y) \end{cases}$$

les composantes du vecteur déformation d'un point $M(x, y)$, suivant Ox et Oy , dans le cas d'un réseau de direction initiale parallèle à Oy , les franges de Moiré sont les courbes de niveau de la fonction $u(x, y) = mp$. De la même façon, en utilisant un réseau de direction initiale parallèle à Ox , les franges de Moiré sont les courbes de niveau de la fonction $v(x, y) = mp$, celles de la fonction $u(x, y)$ comme les projections sur le plan (x, y) des intersections de la surface $z = u(x, y)$ par les plans $z = mp$.

L'intersection de cette surface par des plans $y = y_0$ perpendiculaires à xOy et parallèles à Ox (où $x = x_0$) ou Oy (où $y = y_0$) permet d'obtenir les courbes $z = u(x, y_0)$ ou $z = u(x_0, y)$.

Il est possible de tracer ces courbes à partir des franges du Moiré. En effet, l'intersection des franges par la droite $y = y_0$ donne successivement les points de la surface $z = u(x, y)$, de coordonnées :

$$\begin{cases} z = mp \\ y = y_0 \end{cases} \quad \text{avec } x \text{ mesuré}$$

sur la figure du Moiré.

A partir de ces différentes courbes :

$$\begin{aligned} z &= u(x, y_0) \\ z &= u(x_0, y) \\ z &= v(x, y_0) \\ z &= v(x_0, y) \end{aligned}$$

il est possible, par dérivation graphique, de déterminer avec plus ou moins de précision les valeurs des dérivées partielles :

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Dans le cas de petites déformations, ces dérivées et les composantes de la déformation sont liées par les relations :

$$\begin{aligned}\varepsilon x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma xy &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}.\end{aligned}$$

Les directions principales de la déformation font avec Ox un angle α et un angle $\alpha + \pi/2$ définis par

$$\boxed{\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\gamma xy}{\varepsilon x - \varepsilon y}}.$$

REMARQUE : Les dérivées partielles de $u(x, y)$ calculées par ce moyen sont des dérivées par rapport aux **coordonnées finales**. Il faudrait en principe repasser aux dérivées par rapport aux coordonnées initiales pour obtenir la description classique du champ des déformations.

Toutefois, dans le cas de petites déformations, les deux descriptions sont quasiment identiques et pourront être confondues. Par contre, il faudrait, dans le cas de grandes déformations, se référer à ces calculs plus complexes.

Signe de la déformation.

Calculons l'angle d'une frange avec l'axe Ox . Soit un point B , de coordonnées :

$$\begin{cases} x = p \\ y = p \frac{(1 + \lambda - \cos \theta)}{\sin \theta}. \end{cases}$$

La valeur algébrique β de l'angle (Ox, OB) est définie par :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 + \lambda - \cos \theta}{\sin \theta} \simeq \frac{\lambda}{\theta}. \quad (7)$$

On retrouve que pour :

- $\theta = 0$, la frange est parallèle à Oy
- $\lambda = 0$.

On a :

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \theta/2 \quad \text{ou} \quad \beta = \theta/2.$$

Pour connaître la variation de β quand θ varie, on peut calculer la dérivée de $\operatorname{tg} \beta = f(\theta)$

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \beta &= \frac{1 + \lambda}{\sin \theta} - \cotg \theta \\ f'(\theta) &= -\frac{\cos \theta \cdot (1 + \lambda)}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta}\end{aligned}$$

le signe de la dérivée est le même que celui de

$$-\lambda + 2 \sin^2 \theta/2.$$

$$f'(\theta) = \frac{1 - \cos \theta - \lambda}{\sin^2 \theta} = \frac{-\lambda + 2 \sin^2 \theta/2}{\sin^2 \theta/2}$$

Si λ est négatif, $\operatorname{tg} \beta$ donc β croît toujours quand θ augmente.

Si λ est positif, $\operatorname{tg} \beta$ décroît quand θ augmente jusqu'à la valeur θ_0 telle que $\lambda - 2 \sin^2 \theta/2 = 0$.

La valeur est très faible. En outre, l'interfrange est également faible et les franges ont quasiment tourné de 90° par rapport à l'angle initial $\theta = 0$. Seule la première partie de la courbe $\operatorname{tg} \beta = F(\theta)$ est bien mise en évidence par l'évolution de la figure du Moiré. Ainsi, dans la zone de petites valeurs de :

- β croît quand θ augmente si λ est négatif,
- β décroît quand θ augmente λ est positif et $\operatorname{tg} \beta$ se comporte comme λ/θ .

Cela signifie que lorsque le réseau déformé pivote par rapport au réseau témoin, les franges de Moiré tournent **dans le même sens** si le réseau déformé est plus « serré » ($\lambda < 0$) que le réseau témoin et en **sens contraire**, si celui-ci est plus « large » ($\lambda > 0$) que le réseau témoin.

Ce moyen simple permet de connaître le signe de la déformation. En effet, il suffit alors de faire pivoter légèrement le réseau témoin, le réseau déformé restant immobile :

— Si le matériau a subi une traction, le réseau témoin est plus « serré » que le réseau déformé, les franges pivotant dans le même sens que le réseau témoin que l'on fait tourner.

— Si le matériau a subi une compression, il se produit le phénomène inverse et les franges pivotent en sens inverse du sens de rotation que l'on applique au réseau témoin.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le processus de dépouillement des franges est relativement simple. Supposons que la pièce dont on veut mesurer les déformations soit recouverte d'un réseau de traits pointillés croisés et que le réseau témoin soit un réseau de traits parallèles. Si l'on appelle x la direction perpendiculaire aux

traits du réseau mère, la déformation en tout point selon l'axe x s'obtiendra de la manière suivante :

— On trace une ligne parallèle à l'axe x et l'on reporte en abscisse sur un papier graphique les différents points correspondant à l'intersection avec les franges en augmentant chaque fois la

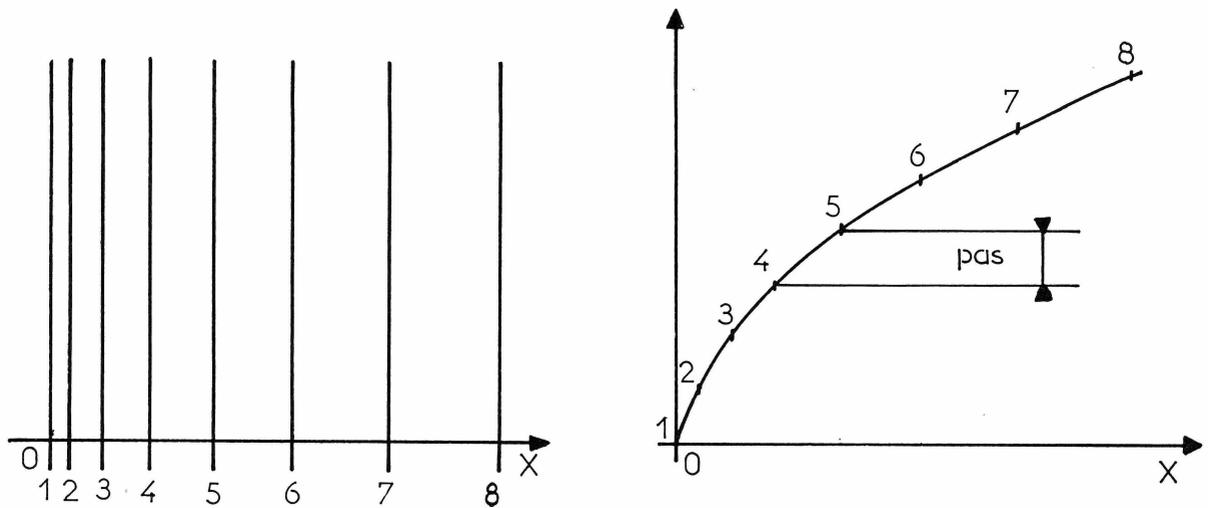


Fig. n° 3

valeur en ordonnée d'une quantité constante représentant le pas du réseau.

La courbe ainsi obtenue représente les déplacements selon x en tout point de l'axe Ox .

— Les déformations s'obtenant par dérivation des courbes de déplacement, la mesure de la pente de la tangente à la courbe donne la déformation en tout point de l'axe Ox .

Si l'on utilise la méthode du Moiré différentiel que nous exposons en détail par la suite, il sera nécessaire pour obtenir la déformation en un point de retrancher à la déformation mesurée sous une contrainte donnée, la valeur de la déformation initiale introduite en l'état de contrainte nulle.

LES POSSIBILITÉS DE LA MÉTHODE ET SES LIMITES D'APPLICATION

La méthode du Moiré permet de mesurer les déplacements puis d'accéder aux déformations par dérivation des courbes ainsi obtenues. Ce tracé peut se faire manuellement sur papier millimétré, mais cela nécessite beaucoup de soin et d'attention. Il n'existe pas actuellement de méthode informatique satisfaisante pour l'interprétation des données fournies par la technique du Moiré. Toutefois, on peut penser que les recherches entreprises dans ce domaine permettront d'aboutir à un dépouillement à la fois plus rapide et plus facile des réseaux de franges du Moiré.

D'autre part, cette méthode n'est pas utilisable pour des déformations trop faibles (moins de 500 microdéformations) et n'a une précision satisfaisante qu'à partir de 1.000 microdéformations. Pour obtenir cette précision, il est alors nécessaire d'utiliser la méthode du Moiré différentiel de manière à créer un Moiré initial sur l'élément non déformé. Pour cela, il suffit de choisir dès le départ deux réseaux de pas très voisins mais non identiques. Ainsi, on mesure les déplacements subis par les franges constituant le Moiré initial.

MOIRÉ DIFFÉRENTIEL.

Il s'agit d'augmenter le nombre de points permettant de tracer les courbes de déplacement puis les courbes de déformation. Il est possible de modifier ce nombre de points en tenant compte de la propriété « d'additivité » du Moiré. En effet, supposons que le réseau déformé ait subi une première déformation telle que :

$$e_1 = e(1 + \lambda_1)$$

et que l'angle des deux réseaux soit θ_1 .

A cette déformation correspond un champ de déplacements et une figure

$$\begin{cases} u_1(x, y) \\ v_1(x, y) \end{cases}$$

formée pour des franges de Moiré. Si λ_1 et θ_1 sont petits, les interfranges mesurées selon Ox et Oy sont égales à :

$$f_x = \frac{e}{\lambda_1} \quad \text{et} \quad f_y = \frac{-e}{\theta_1}.$$

A cette interfrange correspond un déplacement de composantes :

$$u_1(x, y) = p$$

et :

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{e}{f_x} = \lambda_1$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial y} = \frac{e}{f_y} = -\theta_1.$$

Si le réseau témoin subit par rapport à ce nouvel état une deuxième déformation x se traduisant par des déplacements de composantes $u(x, y)$ et $v(x, y)$ selon Ox et Oy . Au total le réseau déformé a subi par rapport à l'état initial une déformation qui se traduit par un déplacement de composantes :

$$u_2(x, y) = u_1(x - dx, y - dy) + u(x, y)$$

$$v_2(x, y) = v_1(x - dx, y - dy) + v(x, y)$$

$(x - dx, y - dy)$ sont les coordonnées du point M_1 qui est venu en $M(x, y)$ dans la deuxième déformation. Dans le cas des petites déformations qui nous intéressent M_1 et M sont quasiment confondus et les résultats deviennent :

$$u_2(x, y) = u_1(x, y) + u(x, y)$$

$$v_2(x, y) = v_1(x, y) + v(x, y).$$

A partir d'une figure de Moiré traduisant un état initial de déformation et d'une deuxième figure de Moiré traduisant un deuxième état de déformation, il est donc possible de calculer la déformation qui fait passer d'un état à l'autre, ce qui est d'une grande importance pratique :

a) en raison des imperfections inévitables dues à la technique. En effet, deux réseaux n'étant jamais strictement identiques, même à l'état « zéro », des franges de Moiré apparaissent. Ces défauts n'ont aucune importance dans le cas d'une étude par Moiré différentiel.

b) Il est toujours possible de créer artificiellement un état initial de déformation en choisissant dès le départ un réseau témoin de pas légèrement différent du réseau à déformer [$p_1 = p(1 + \lambda)$], ou en faisant légèrement pivoter ce réseau de manière à créer immédiatement un faisceau de franges plus ou moins serrées représentant une déformation initiale telle que :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda_1 \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\theta_1. \end{cases}$$

En effet, le réseau témoin a pour pas $p_1 = p(1 + \lambda_1)$, p étant le pas du réseau déformé pour une déformation nulle. De la même façon $p = p_1(1 - \lambda_1)$, ce qui revient à

dire que, par rapport au réseau témoin, le réseau déformé semble avoir subi une déformation fictive caractérisée par :

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = -\lambda_1$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial y} = \theta_1$$

et les interfranges correspondantes seront :

$$f_x = -\frac{e}{\lambda_1} \quad \text{et} \quad f_y = \frac{e}{\theta_1}.$$

La déformation réelle du réseau déformé se traduit par les équations suivantes :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lambda \quad \text{et} \quad f_x = \frac{e}{\lambda}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\theta \quad \text{et} \quad f_y = -\frac{e}{\theta}.$$

La déformation totale correspond alors à un réseau déformé de pas p' tel que :

$$p' = p(1 + \lambda) = p_1(1 - \lambda_1)(1 + \lambda)$$

d'où en approximation du premier ordre :

$$p' \simeq p_1(1 + \lambda - \lambda_1)$$

ce réseau déformé fait un angle θ avec le même réseau déformé à l'état de déformation nulle et un angle $\theta - \theta_1$ avec le réseau témoin.

Les expressions des déformations deviennent alors :

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = \lambda - \lambda_1 \quad \text{et} \quad f_x = \frac{e}{\lambda - \lambda_1}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = \theta - \theta_1 \quad \text{et} \quad f_y = -\frac{e}{\theta - \theta_1}$$

f_x et f_y étant les nouvelles interfranges.

Pour augmenter le nombre de points servant à tracer $z = u(x, y_0)$, il faut diminuer l'interfrange f_x donc augmenter $|\lambda - \lambda_1|$. De même, pour $z = u(x_0, y)$, il faut augmenter $|\theta - \theta_1|$.

En pratique, cela revient à dire qu'il faudra, pour étudier une déformation en tension ($\lambda > 0$), prendre comme réseau témoin, un réseau plus « serré » que le réseau déformé. En effet, pendant la traction, les franges vont se resserrer progressivement.

Pour étudier une compression, il suffit de faire l'inverse. Le signe de la déformation est donné par le procédé expliqué p. 54.

De plus, pour augmenter la précision du calcul de la déformation angulaire, il faudra imprimer au départ au réseau témoin une légère rotation en sens inverse de la rotation à mesurer.

REMARQUE : Il peut être intéressant dans certains cas de rendre les franges le plus possible perpendiculaires à la direction (Ox ou Oy) selon laquelle on mesure les coordonnées (x ou y) afin

d'obtenir une détermination plus précise de l'intersection de cette frange avec les droites $x = x_0$ ou $y = y_0$.

Dans le cas d'un réseau parallèle à Oy , l'angle de la frange avec Ox est défini par $\text{tg } \beta \simeq \lambda/\theta$.

Pour étudier $\partial u/\partial x$ (déformation le long d'une ligne parallèle à Ox), il est préférable de prendre un angle voisin de $\pi/2$ donc $\text{tg } \beta$ très grand. Pour cela, il y a deux solutions :

— Augmenter λ en provoquant, par le choix d'un réseau témoin de pas légèrement différent, une déformation fictive dans le même sens que la déformation future réelle afin de resserrer les franges et ainsi augmenter le nombre de points de mesure.

— Provoquer une rotation du réseau témoin inverse à la rotation qui serait observée en cours d'essai, ce qui a pour effet de desserrer les franges sans changer toutefois le nombre de points de mesure.

De la même façon, afin d'augmenter la précision

pour la mesure des déformations le long d'une direction parallèle à Oy , on pourra :

— Provoquer une rotation du réseau témoin dans le même sens que la rotation qui serait observée en cours d'essai, afin de resserrer les franges et augmenter le nombre de points de mesure.

— Diminuer λ en provoquant pour le choix du réseau témoin une déformation fictive initiale en sens inverse de la déformation à observer afin de desserrer les franges sans changer le nombre de points de mesure.

Cette technique devrait permettre un progrès considérable dans le domaine des déformations associées à des déplacements plus ou moins importants et en particulier, en ce qui concerne l'étude des joints de colle dans les structures et des glissements pouvant se produire à leur niveau. En outre, elle devrait fournir un nouvel instrument de travail à l'étude des fissurations et de la répartition des contraintes au voisinage de points singuliers tels que les nœuds.

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE

INTRODUCTION

La mise en œuvre de la méthode du Moiré passe nécessairement par la résolution d'un certain nombre de problèmes se présentant à deux niveaux différents :

— d'une part, l'application du réseau sur le matériau,

— d'autre part, la prise de vue des franges de Moiré réalisées par interférence avec le réseau témoin.

LES DIFFÉRENTES SORTES DE RÉSEAUX

Il existe principalement trois sortes de réseaux permettant de donner des informations différentes lorsqu'ils sont employés sur leurs réseaux mères associés.

Les réseaux à traits parallèles sont constitués de lignes parallèles et équidistantes. Ils sont, le plus souvent, utilisés en tant que réseau témoin.

Les réseaux à traits croisés sont constitués par des traits pointillés disposés selon deux directions perpendiculaires. Les lignes ainsi formées ne se superposent pas et sont libres de se déplacer dans toutes les directions, ce qui n'est pas le cas pour les réseaux à lignes croisées en raison de l'effet de renforcement se produisant aux nœuds du réseau. En outre, il n'existe pas dans ce cas de limite

maximale pour la mesure des déformations. Les réseaux de ce type que l'on peut trouver dans le commerce ont des densités de lignes variant généralement de 8 à 80 traits/mm.

Outre, les réseaux standards à lignes parallèles ou à traits pointillés croisés, il est possible, pour répondre à des besoins spécifiques, d'utiliser des réseaux dits particuliers. Ces réseaux peuvent, par exemple, être constitués de cercles concentriques. Les réseaux commerciaux de ce type sont appelés « jauges rosettes ». Ils permettent ainsi d'obtenir, dans certains cas, des informations qu'il serait impossible de recueillir avec des réseaux classiques à traits rectilignes.

LA FABRICATION ET LA MISE EN ŒUVRE DES RÉSEAUX

Application du réseau sur le matériau

Trois méthodes sont actuellement utilisées de manière assez courante.

— Celle qui donne les meilleurs résultats consiste en une gravure directe du réseau sur le matériau à

partir de procédés photo-chimiques. Toutefois, elle n'est guère possible à mettre en œuvre que sur du métal ou une surface métallisée. Cette technique semble donc *a priori*, très difficile à appliquer sur le bois.

— Une seconde méthode consiste en l'impression du réseau sur la pièce à étudier. Elle pose de gros problèmes de mise en œuvre qui ne sont absolument pas résolus pour son application au matériau bois. En effet, il faut, en premier lieu, réussir à recouvrir le bois par une fine couche d'un produit servant au bouche porage sans modifier les propriétés mécaniques du matériau. Il doit, en outre, réaliser un bon support pour la résine photosensible. Enfin, il ne doit pas être attaqué ou coloré par les produits de développement de la résine car on utilise, pour obtenir un fort contraste, des colorants puissants qui imprègnent la plupart des résines et colles chimiques.

— Enfin, la troisième méthode et certainement la plus accessible en premier temps, réside dans le collage sur la pièce d'un film très fin ($15\ \mu$) sur lequel les réseaux sont imprimés par des procédés photographiques. Ils sont photographiés, par contact, sur films pelliculables à partir d'un réseau mère sur verre. Le collage s'effectue en utilisant une colle blanche très souple de faible module d'élasticité afin de ne pas fausser par amélioration de la résistance mécanique naturelle du bois, les phénomènes ainsi observés. Ce type de colle est couramment utilisé comme revêtement sur les bétons. Sa manipulation ne pose pas de gros problèmes et l'on obtient de bons Moirés, moyennant un certain nombre de précautions élémentaires. Il convient, en particulier, d'éliminer au moment du collage toutes les bulles d'air pouvant se former. En outre, la surface de la colle doit être rendue la plus plane possible immédiatement après application du film. La polymérisation se fait en une nuit à température ambiante. Il suffit de retirer alors le support du film pelliculable pour que l'opération soit terminée.

Réalisation du Moiré.

Pour faire apparaître les franges de Moiré, il faut superposer au réseau collé un réseau témoin le plus parallèlement possible et selon les directions dans lesquelles l'on souhaite mesurer les déplacements.

Les deux grands types de méthodes applicables sont :

— contact direct avec les réseaux,

— transmission du réseau collé sur le réseau témoin à partir d'un système optique à une certaine distance de la structure à étudier.

Cette dernière méthode permet une plus grande diversité d'utilisation puisqu'elle ne nécessite pas le contact direct des deux réseaux. Toutefois, elle suppose l'utilisation d'un matériel optique de très bonne qualité monté sur un banc d'expérimentation disposant de réglages mécaniques de très haute précision.

Par contre, la première méthode quoique extrêmement rudimentaire, donne des Moiré de qualité très convenable, chaque fois qu'il est possible d'assurer le contact des deux réseaux. Pour cela, la grille témoin, constituée elle-même par un film porteur du dessin du réseau mère, est directement appliquée sur le réseau collé à la surface du matériau. Le contact est assuré par un film très fin d'huile de paraffine. On peut ainsi obtenir d'assez bons Moiré, même si la surface de référence présentée par le réseau collé n'est pas tout à fait régulière ou si la déformation n'est pas plane. Ceci serait, bien sûr, impossible à réaliser à partir d'un réseau témoin sur verre. L'interprétation des résultats qui ne nécessite pas, dans ces conditions, l'emploi d'un matériel particulier sera effectuée à partir d'une série de photographies des réseaux de franges ainsi formés.

CONCLUSIONS

Nous avons retenu pour cette première étude le procédé de mise en œuvre le plus commode et le plus simple.

Le réseau associé aux déformations de la struc-

ture à étudier sera donc obtenu par collage sur le matériau d'un réseau pelliculable. Les franges de Moiré seront obtenues par superposition directe par contact du réseau collé et du réseau témoin.

(A suivre)