

Les techniques photoélastiques



MEC6405 - Analyse expérimentale des contraintes

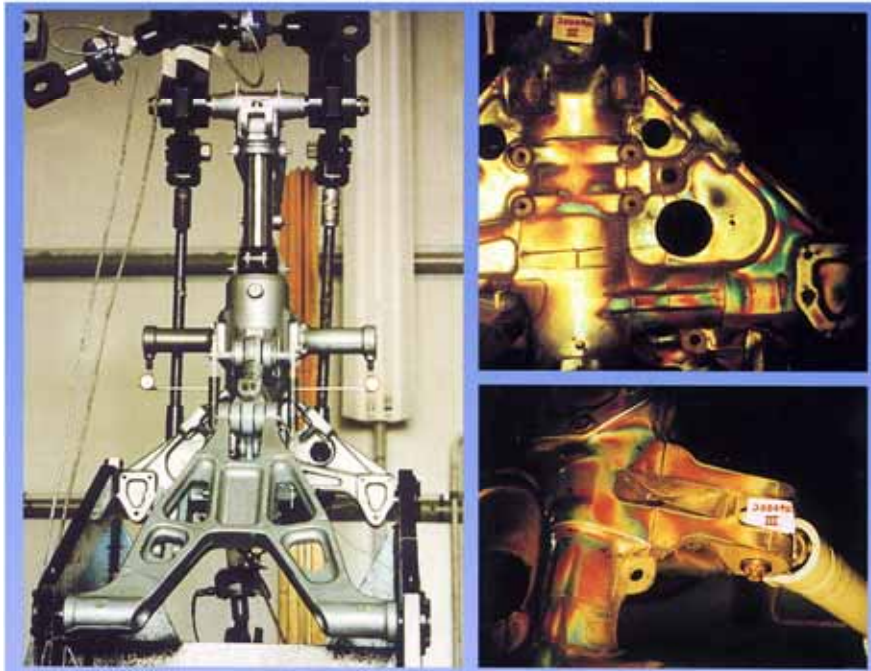
COURS #7

Automne 2012

Introduction

- Dans les techniques photoélastiques, l'effet physique mis en cause est ici un effet optique appelé la biréfringence accidentelle (ou double réfraction) de certains matériaux transparents qui est causée par l'application d'un état de contrainte.
- La photoélasticimétrie est une technique de champ qui mesure de façon quantitative le niveau et la direction des contraintes principales dans toute la région étudiée.
- De nos jours, la technique de recouvrement photoélastique (Photo Stress) est toujours utilisée pour mesurer directement les contraintes sur des prototypes ou des structures réelles.

Photoélasticité



Recouvrement photoélastique sur un train d'atterrissage d'avion



Fig. 31 - Bâti de presse (Cliché STCAN). La répartition parfaite des figures photoélastiques obtenues sur une prise symétrique est un indice de la haute fidélité du procédé. Par fidélité à un dessinage, on peut donc également obtenir une grande précision.

Modèle 2D du bâti d'une presse

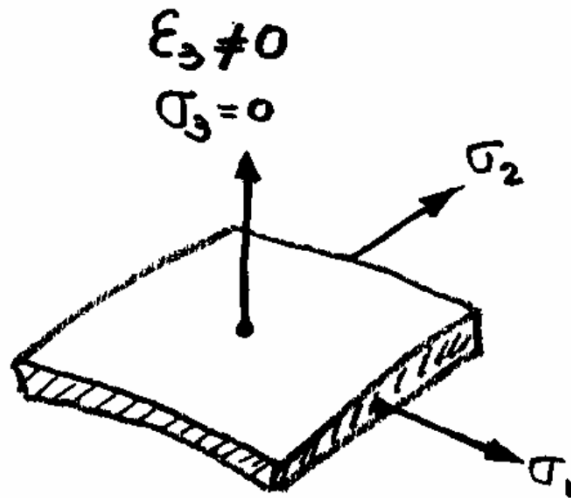
Photoélasticité par réflexion



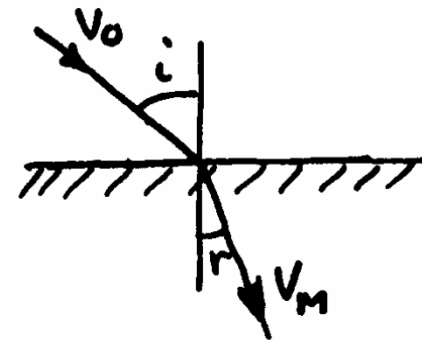
Pièce de suspension avant d'une voiture

Principes de base

État plan de contrainte



Indice de réfraction



$$n_M = \frac{V_0}{V_M} \quad n_M = \frac{\sin i}{\sin r}$$

n_M varie dans un milieu optiquement anisotrope.

Optique ondulatoire (hypothèses)

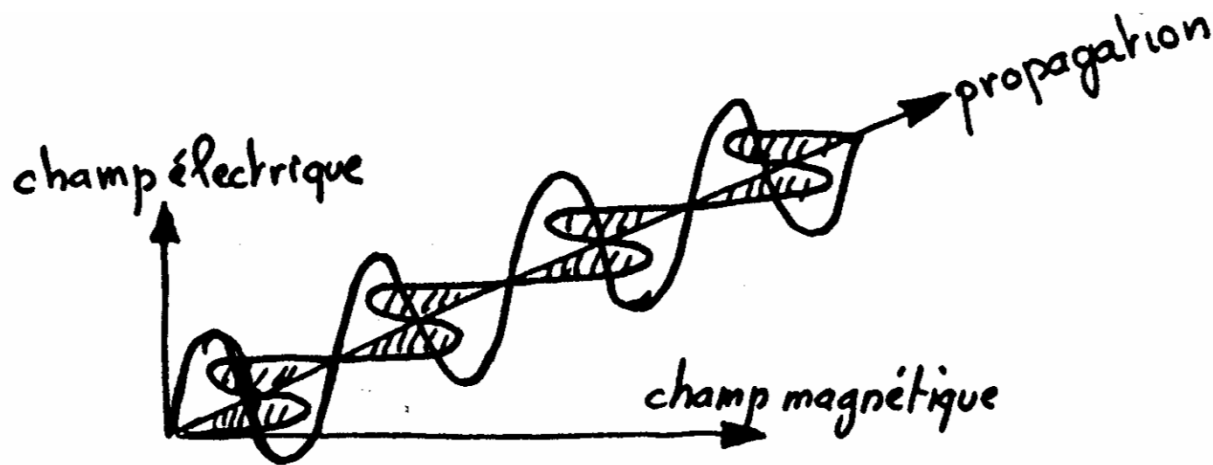
1. La lumière est la conséquence de mouvements vibratoires et se propage par ondes sinusoïdales
2. Une onde monochromatique comporte deux grandeurs vectorielles sinusoïdales en phase et perpendiculaires: le champ électrique et le champ magnétique
3. L'énergie de l'onde lumineuse est proportionnelle au produit de l'amplitude du champ électrique et du champ magnétique (amplitude au carré)

Lumière monochromatique

(une seule longueur d'onde λ)

- Ondes sinusoïdales

$$y = a \sin \omega t$$



Onde électromagnétique

Lumière blanche

Comprend toutes les longueurs d'onde visibles qui sont comprises entre 4000 Å et 7000 Å

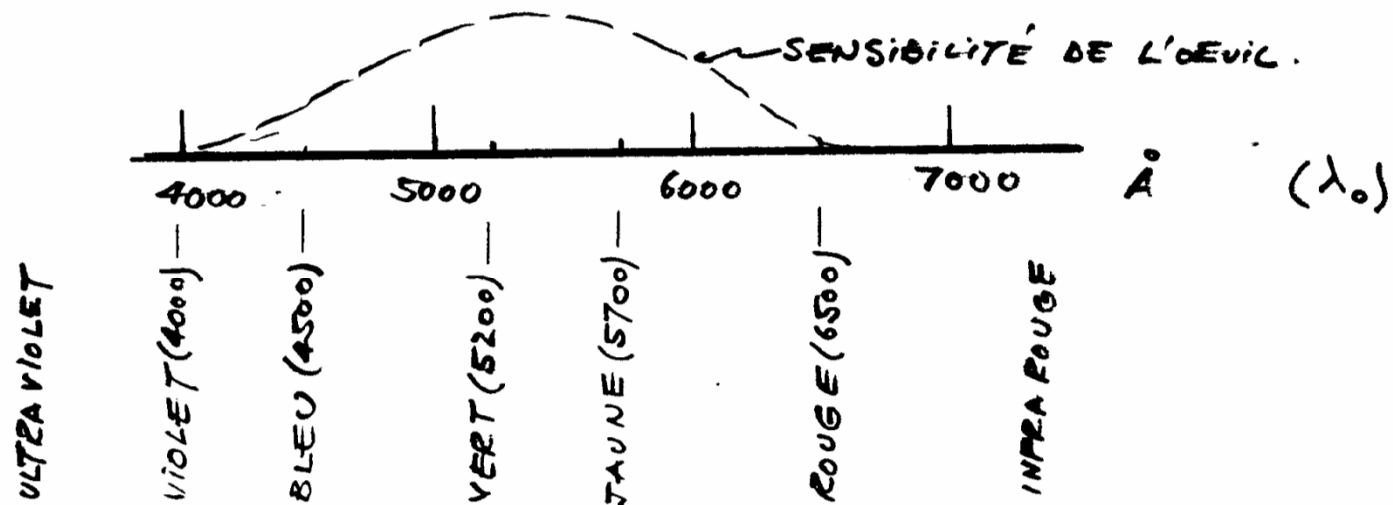
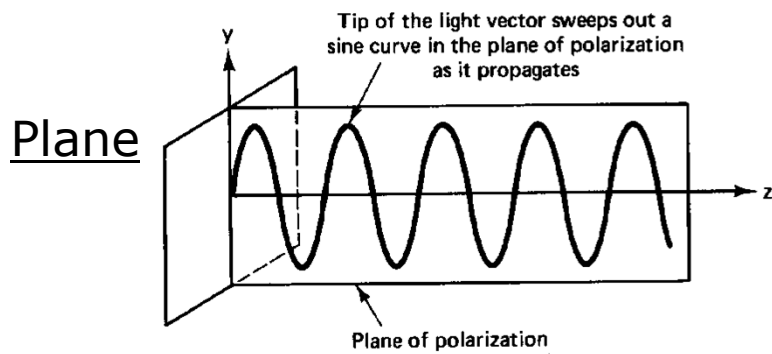


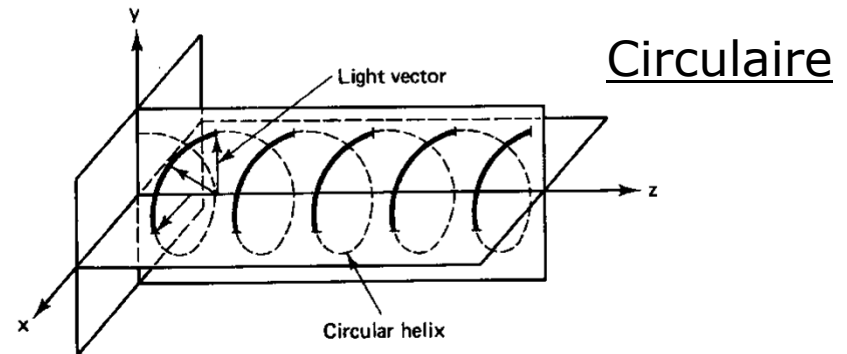
Figure 5.3 – Spectre visible

Polarisation

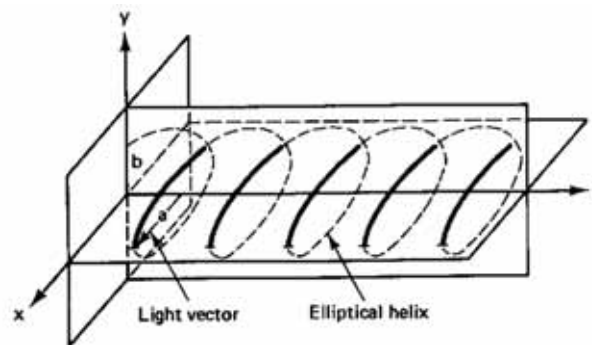
Contrairement à la lumière naturelle, une onde polarisée vibre selon un mode contrôlé



(a)



(b)

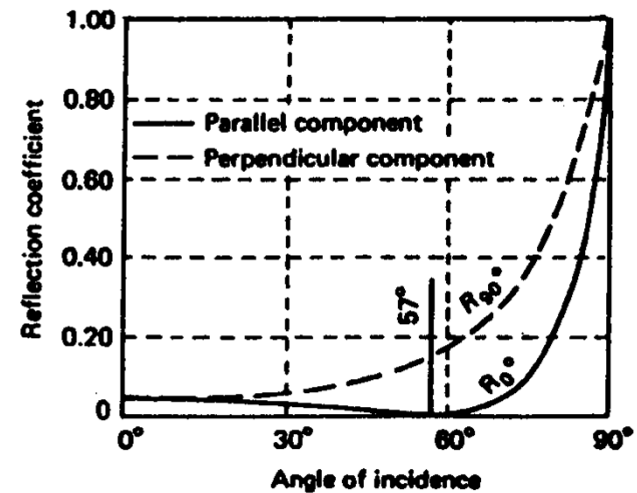
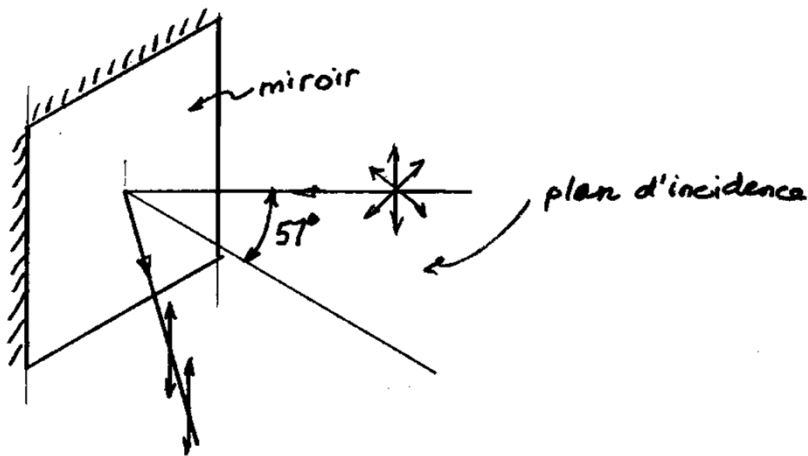


(c)

Elliptique

Méthodes de polarisation

Polarisation plane par réflexion



Polarisation par transmission: filtres polarisants

Le filtre POLAROÏD est un matériau transparent qui contient de microscopiques cristaux d'iode en forme d'aiguilles qui sont alignés par étirement.

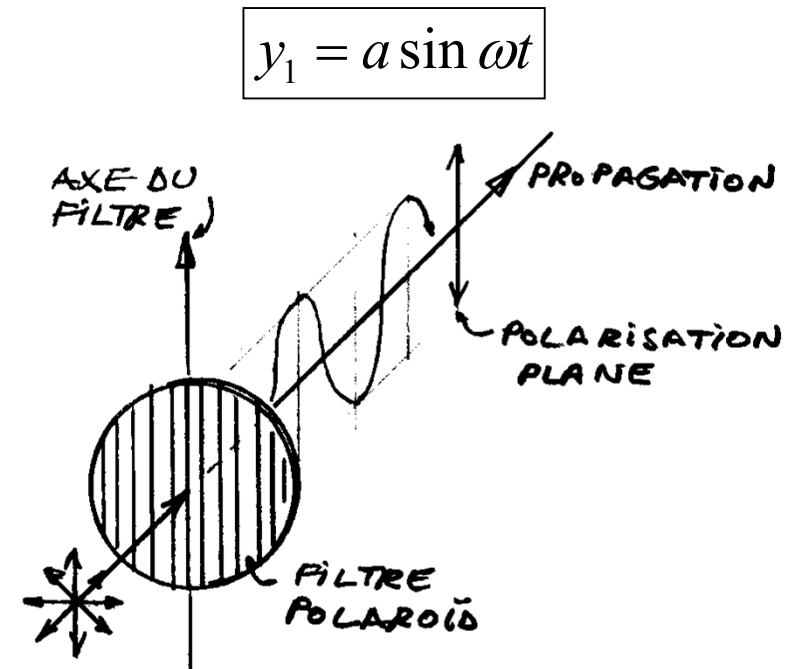
Composition:

Mince film d'alcool de polyvinyle chauffé, étiré puis collé à une feuille de cellulose.

Exemple: Filtre HN 22

22% lumière transmise polarisée

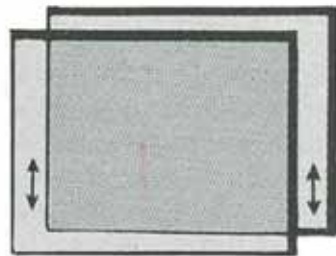
10^{-6} lumière non polarisée transmise



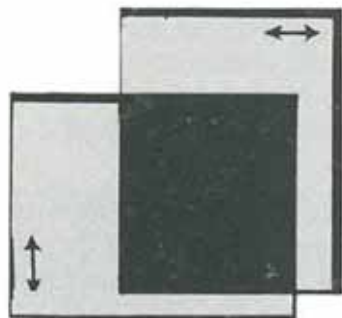
Polariseurs et analyseurs

- Un polariseur est un filtre polarisant qui recevant de la lumière naturelle non-polarisée, donne de la lumière polarisée à sa sortie.
- Un analyseur est également un filtre polarisant qui recevant de la lumière polarisée, permet de déterminer le plan de polarisation **par extinction** du faisceau sortant (voir diapo. suivante)
- Tout polariseur peut servir d'analyseur et vice et versa.

Utilisation des filtres Polaroid



(a) Filtres polaroid parallèles

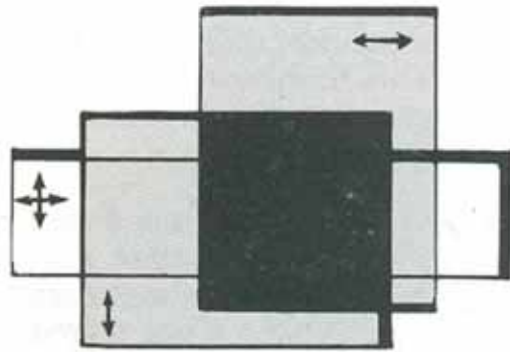


(b) Filtres polaroid croisés, extinction

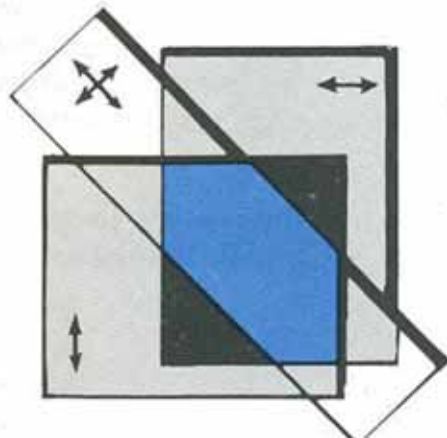
Biréfringence naturelle

- Certains corps présentent naturellement le phénomène de biréfringence ou double réfraction
- L'indice de réfraction passe par des valeurs minimum et maximum selon des directions qu'on appelle axes optiques principaux ou encore axes de biréfringence
- Lorsqu'elle traverse un corps biréfringent, une lumière plane polarisée se divise en deux composantes autonomes (ondes polarisées planes) parallèles aux axes optiques principaux.
- Le phénomène de biréfringence se caractérise par un retard optique (δ) entre les deux composantes à la sortie du corps biréfringent

Corps avec biréfringence naturelle



(c) Axes optiques du corps parallèles à ceux des polaroïds



(d) Axes optiques du corps biréfringent non parallèles à ceux des polaroïds.
La couleur indique la présence de phénomènes d'interférence (retard)

Biréfringence accidentelle

- La plupart des corps transparents, isotropes et normalement non biréfringents, le deviennent lorsqu'ils sont soumis à un état de contrainte (phénomène instantané)
- Les axes principaux de l'état de contrainte coïncident avec les axes optiques principaux
- Les indices de réfraction principaux, sont en relation linéaire avec les contraintes principales

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = n_1(\sigma_1, \sigma_2) \\ n_2 = n_2(\sigma_1, \sigma_2) \end{array} \right\} n_1 - n_2 = k(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$n_1 \text{ maximum} \rightarrow V_1 \text{ minimum}$$

$$n_2 \text{ minimum} \rightarrow V_2 \text{ maximum}$$

Biréfringence accidentelle (suite)

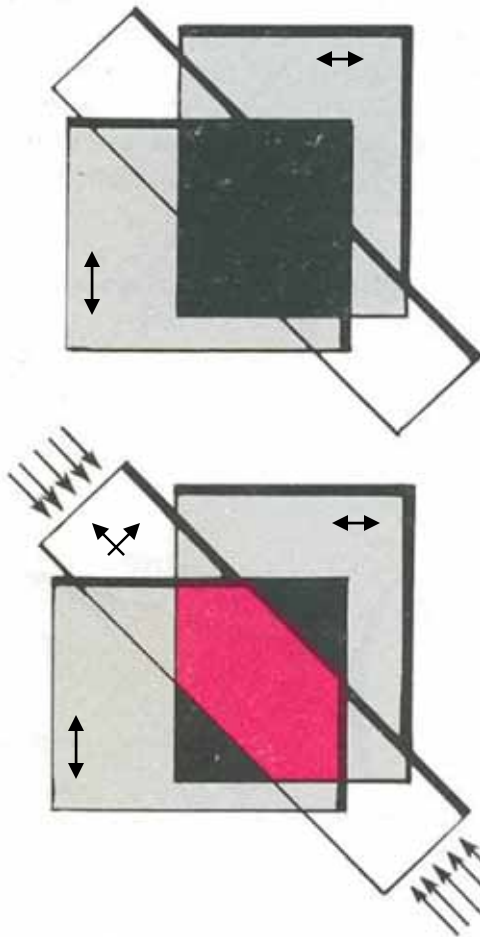
- Les deux composantes de la lumière qui sortent du corps biréfringent vont vibrer selon des plans orthogonaux qui sont parallèles aux directions des contraintes principales (σ_1 et σ_2)
- Elles ont la même fréquence mais sont déphasées l'une par rapport à l'autre (interférence possible)
- Le retard optique δ entre ces deux composantes sera proportionnel à:
 - la différence entre les contraintes principales
 - l'épaisseur "d" du matériau.

$$\delta = c \cdot d \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\delta = V_0 (t_1 - t_2)$$

le retard est mesuré
avec un polariscope

Corps avec biréfringence accidentelle



(e) À contrainte nulle,
pas de phénomène de
biréfringence

(f) Apparition d'axes optiques
principaux sous l'effet des
contraintes (biréfringence
accidentelle)

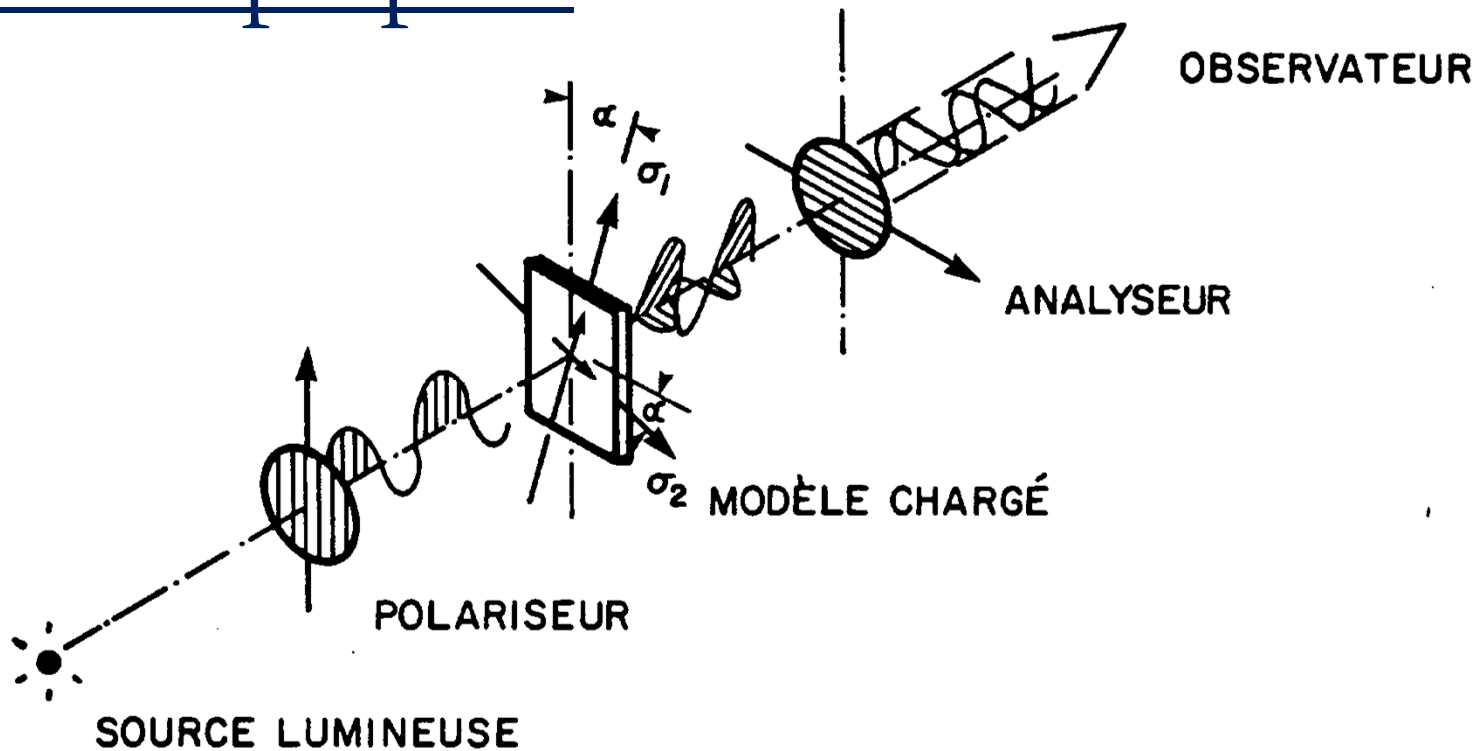
Les différents procédés de la photoélasticité

- La photoélasticité par transmission
 - Se pratique sur des modèles transparents bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D)
- La photoélasticité par réflexion
 - Dans ce cas, on colle sur la pièce un revêtement photoélastique transparent

Le polariscope

- Sert à mesurer les deux phénomènes caractéristiques de la biréfringence accidentelle:
 - La direction des axes principaux
 - Le retard optique entre n_1 et n_2 , ce qui permet d'évaluer les contraintes principales
- Avec un polaroïd placé à la sortie du modèle (analyseur), le polariscope ramène dans un même plan les ondes n_1 et n_2 et leur donne la même amplitude afin de les faire interférer entre-elles car elles sont déphasées

Polariscope plan

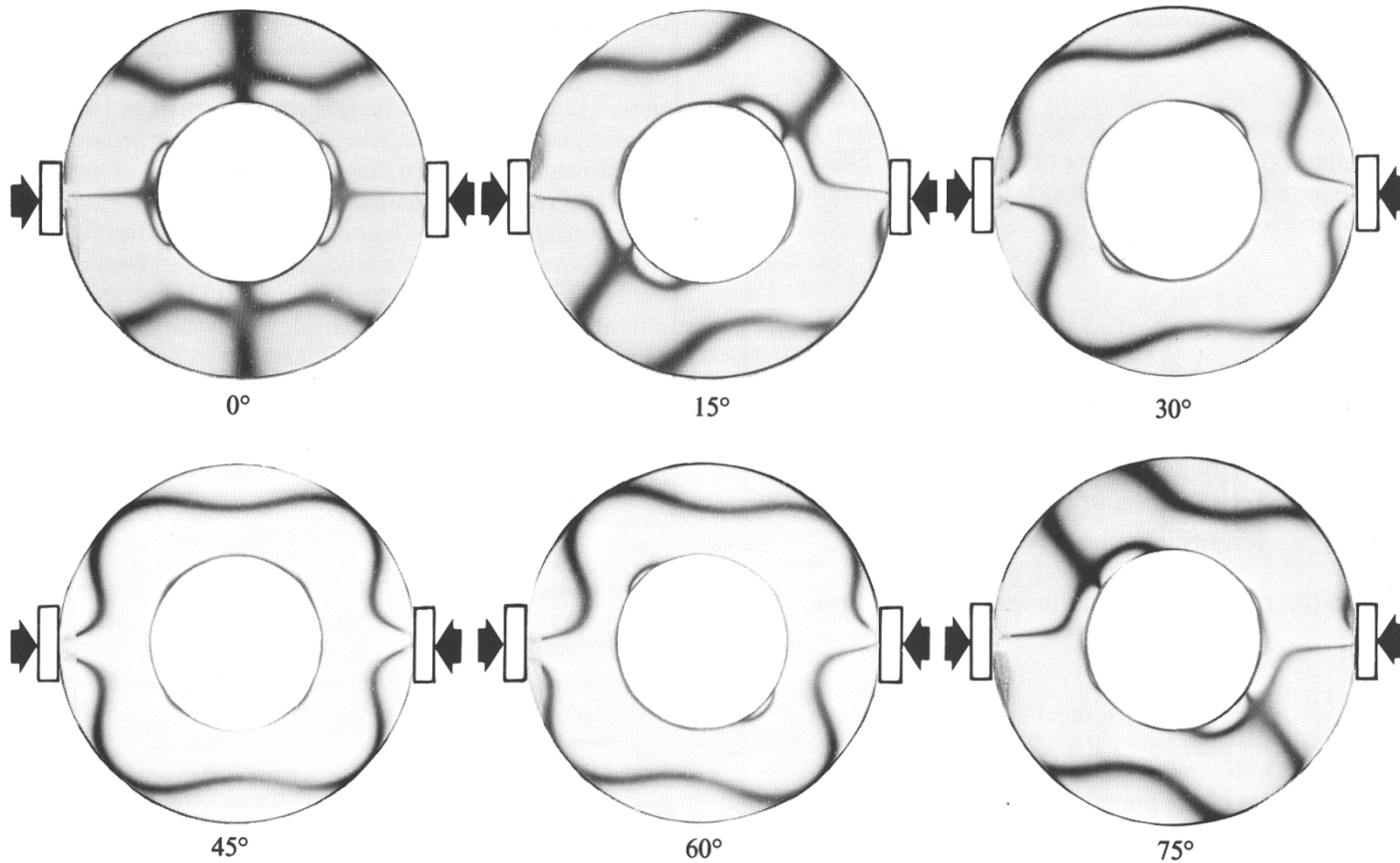


L'intensité lumineuse à la sortie de l'analyseur est :

$$I = y_{\max}^2 = a \sin^2(2\alpha) \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \right] = 0 \text{ si extinction}$$

Isoclines

$$\sin^2(2\alpha) = 0$$



Angle des polaroïds

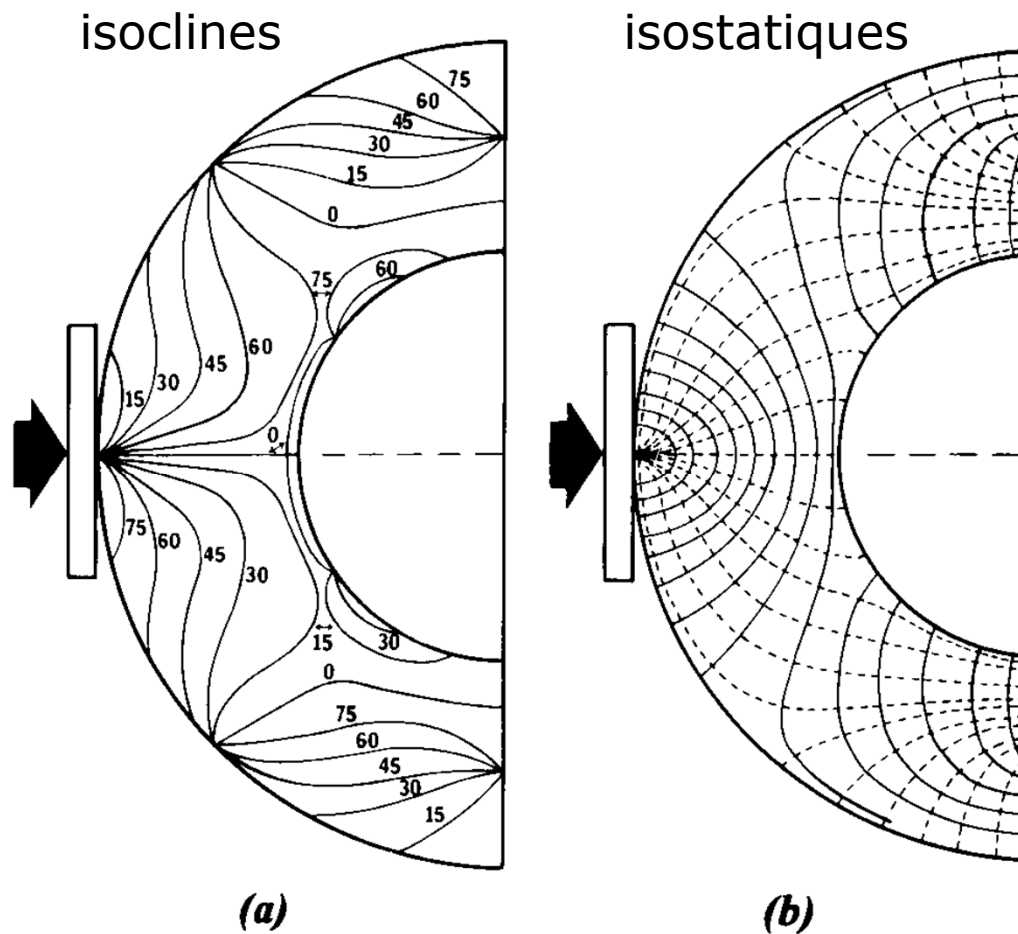
Propriétés des isoclines

- Ne se croisent pas sauf aux points d'isotropie
- Isoclines aux axes de symétrie du modèle
- Sur le bord du modèle, les isoclines font un angle de 90° par rapport à la tangente de la paroi
- Un bord droit est une isocline

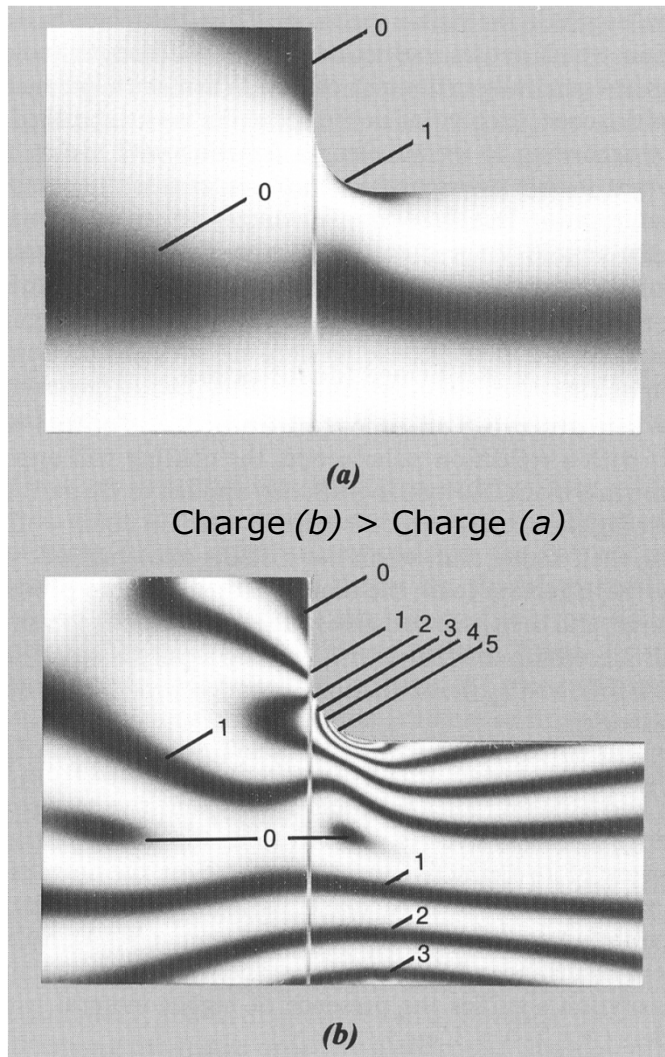
Utilité des isoclines

- Donnent l'orientation des contraintes principales dans tout le corps
- Servent à tracer les isostatiques (lignes de force perpendiculaires aux isoclines)
- Servent à l'interpolation des isochromes (méthode de Tardy)

Isoclines et isostatiques



Isochromes (lumière monochrome)



Extinction lorsque

$$\sin^2 \left[\frac{\pi \cdot c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \right] = 0$$

c'est-à-dire que

$$\frac{c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) = N \quad (\text{entier})$$

$N = 0$	frange 0	$(\sigma_1 - \sigma_2) = 0$
$N = 1$	frange 1	$(\sigma_1 - \sigma_2) = f/d$
$N = 2$	frange 2	$(\sigma_1 - \sigma_2) = 2f/d$

etc.

Isochrome = lieu d'égal τ_{max}

Coefficients de frange "f"

$$\frac{\lambda}{c \cdot d} = \frac{f}{d} \quad \text{avec} \quad f = \frac{\lambda}{c}$$

Matériau	f (MPa.m/frange)
Gélatine	0.035
Époxy chaud	0.38
Époxy froid	16.3
Bakelite	21.7
Verre	217-434
→ Polyuréthane	0.28
Polycarbonate	7

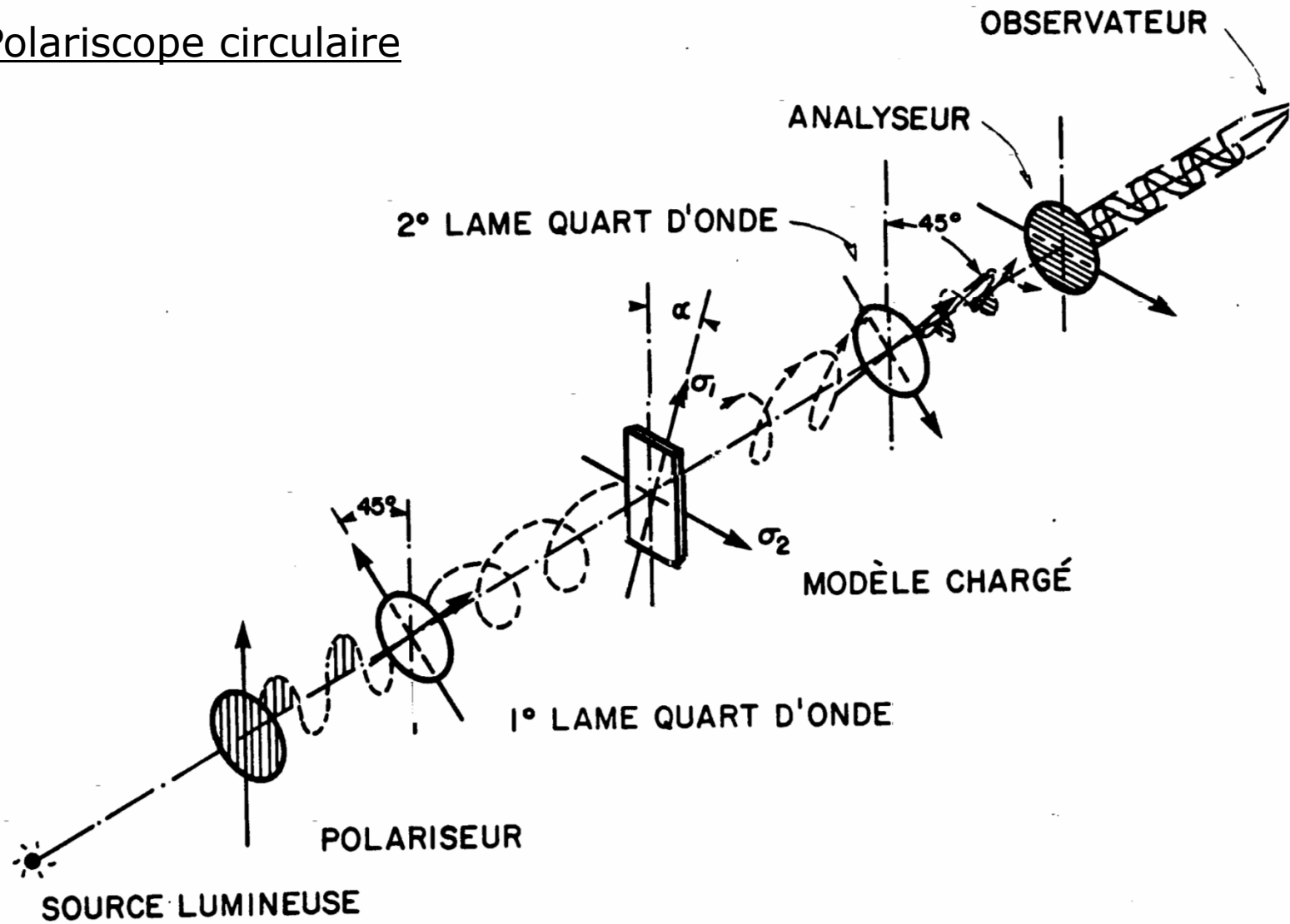
Isoclines vs Isochromes

- Deux types de franges qui apparaissent simultanément dans le modèle
- Toutes les deux sont noires (lumière monochromatique)
- Si on augmente la charge
 - Les isochromes se déplacent et se multiplient
 - Les isoclines ne bougent pas
- Si on tourne P et A simultanément
 - Les isochromes restent immobiles
 - Les isoclines se déplacent

Polariscope circulaire

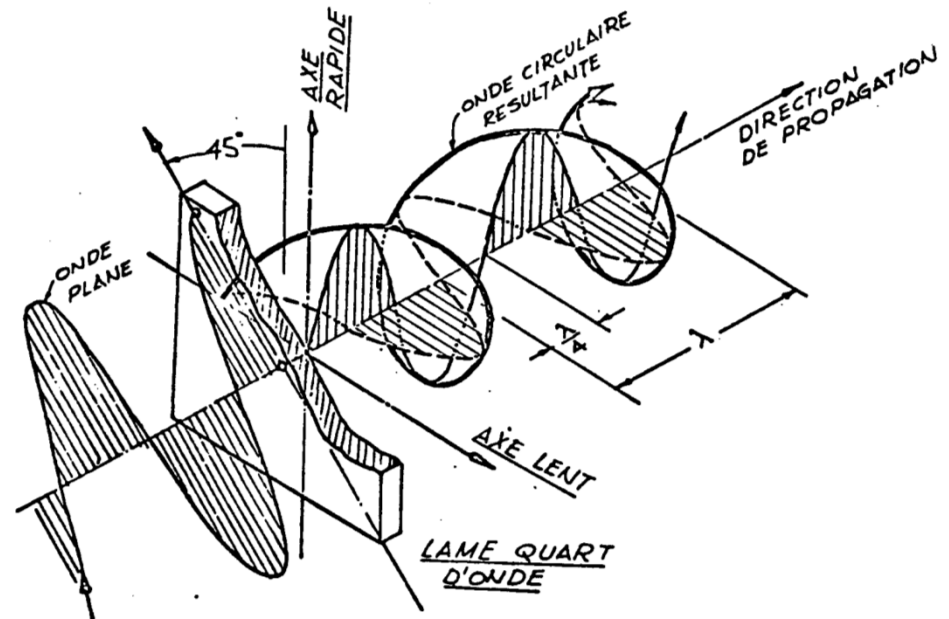
- Ce type de polariscope "élimine" les isoclines et ne laisse voir que les isochromes (très pratique pour mesurer les contraintes)
- En plus des filtres P et A, il comprend deux lames quart d'onde qui sont placées de part et d'autre du modèle

Polariscope circulaire



Lame quart d'onde

- Corps biréfringent stable
- Décompose la lumière polarisée plane en deux composantes mutuellement perpendiculaires
- Le retard optique entre les composantes est égal à $\frac{1}{4}$ de la longueur d'onde de la lumière incidente
- Si la lumière polarisée incidente fait un angle de 45° , les deux composantes de la lumière transmise auront la même amplitude et se combineront pour former une lumière polarisée circulaire.



Élimination des isoclines

- Dans un modèle traversé par la lumière polarisée circulaire, la position des isoclines change continuellement puisque l'angle d'incidence α de la lumière varie à la vitesse $\omega = 2\pi V/\lambda$
- L'œil n'est pas assez rapide pour percevoir la position des isoclines qui deviennent alors invisibles à l'observateur

Isochromes

- Pour les isochromes, leur position ne dépend que de l'intensité des contraintes et n'est pas tributaire de l'angle d'incidence de la lumière
- Il y a donc extinction de la même façon que dans le polariscope plan

$$\sin^2 \left[\frac{\pi \cdot c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \right] = 0$$

Fond blanc vs fond noir

- En plaçant les filtres P et A, non plus en position croisée (fond noir), mais parallèles (fond blanc), l'intensité de la lumière à la sortie de l'analyseur devient:

$$I_{\text{fond blanc}} = K \cdot \cos^2 \left[\frac{\pi \cdot c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \right] = K \cdot \cos^2 [\pi N]$$

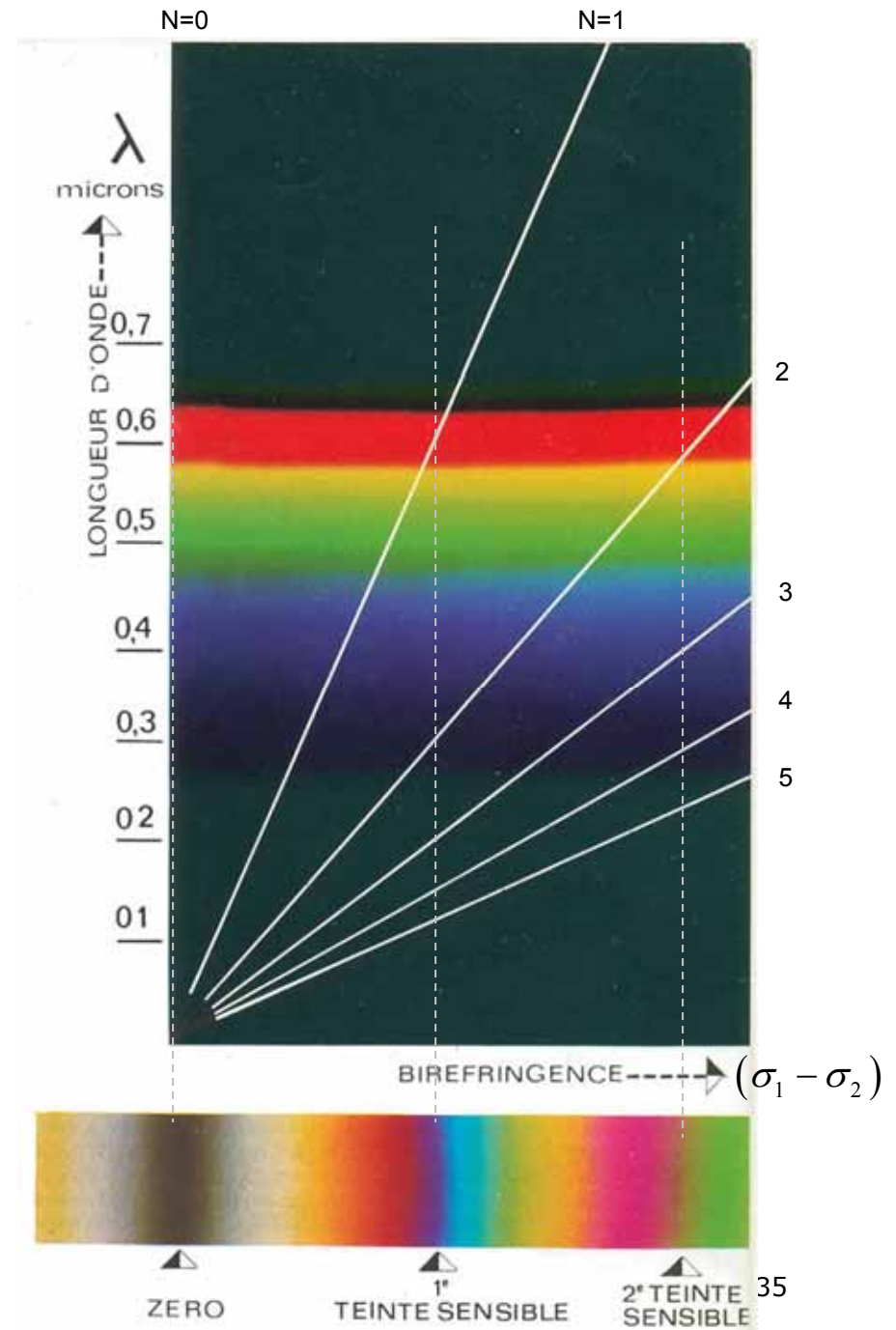
- On aura alors extinction lorsque $N = 1/2, 3/2, 5/2 \dots$, c'est-à-dire pour les demies franges

Phénomènes en lumière blanche

Les zones d'extinctions sont représentées par des lignes obliques qui s'expriment par la relation suivante:

$$\lambda = \frac{c \cdot d}{N} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

On rencontre donc un plus grand nombre de franges dans le violet (0.4 μm) que dans le rouge (0.6 μm)



Lumière blanche vs. monochromatique

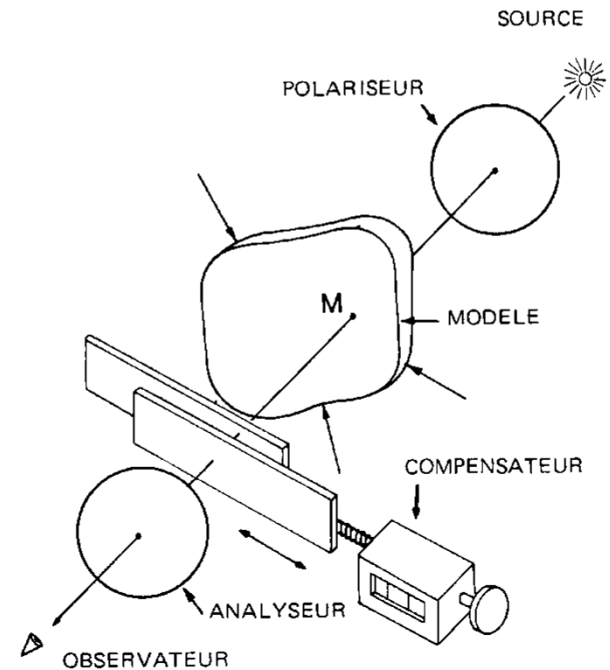
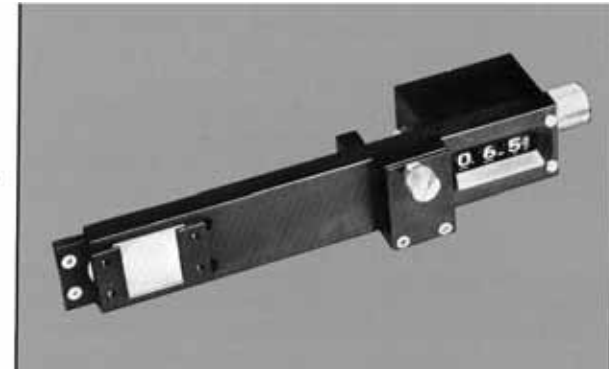
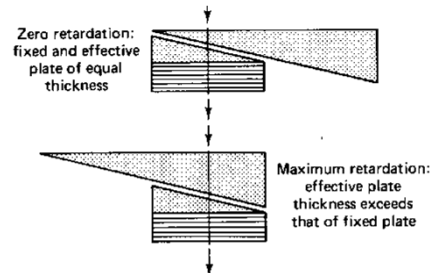
- La lumière blanche permet de:
 - Mieux distinguer les isochromes (en couleurs) des isoclines (noires), sauf pour la frange zéro qui est noire
 - Connaître dans quel sens croît ($\sigma_1 - \sigma_2$)
 - Reconnaître visuellement l'ordre des premières franges
 - Connaître la direction principale σ_1 (Labo. no. 6)
 - Distinguer un maximum de 5 franges
- Lumière monochromatique
 - En principe on peut obtenir un nombre infini de franges, mais elles sont toutes noires.

Comptage des isochromes

- Localiser la frange 0 (noire) dans un coin mort ou à un point d'isotropie
- Charger le modèle graduellement et compter les franges à mesure qu'elles apparaissent
- Utiliser un compensateur si disponible (lumière blanche)
- Analyse sur fond noir ($N=0, 1, 2, \dots$) et sur fond blanc ($N=1/2, 3/2, 5/2, \dots$)
- Utiliser la méthode d'interpolation de Tardy aux points critiques
- Séparer les contraintes aux parois non chargées

Compensateurs

- Corps de biréfringence **connue** qui est placé sur le trajet de la lumière sortant du modèle.
- Il est ajusté de façon à introduire un niveau biréfringence égal mais de signe contraire à celui qui se trouve dans le modèle de façon à obtenir la frange 0 (noire)



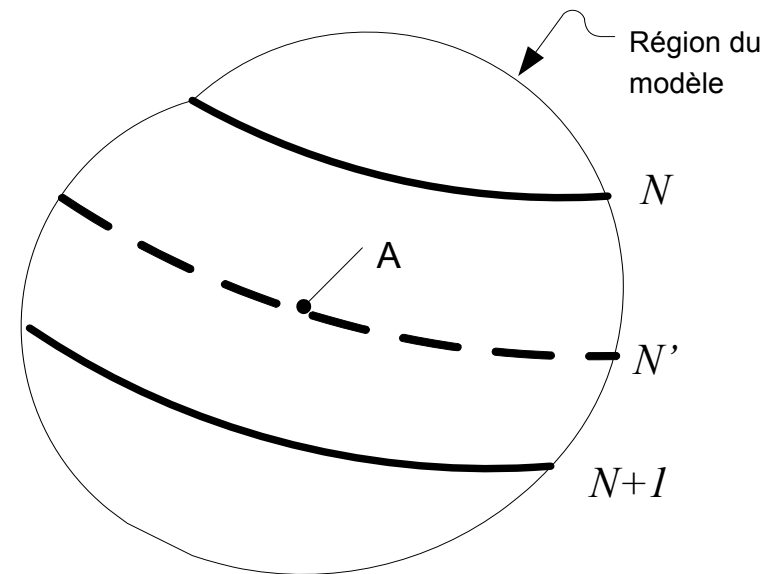
Compensateur Bravais

Interpolation angulaire des isochromes: Méthode de TARDY

- Sert à mesurer la valeur fractionnaire de la frange à un point quelconque A
- Avec un polariscope circulaire, la rotation de l'analyseur cause le déplacement continu et proportionnel des isochromes tel que:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = N' \frac{f}{d} = \left(N \pm \frac{\delta}{\pi} \right) \frac{f}{d}$$

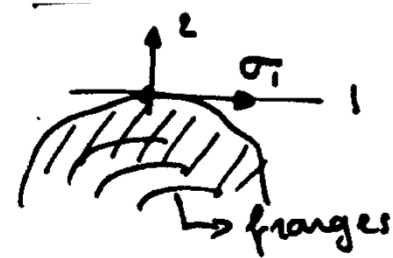
où δ est l'angle de rotation de l'analyseur



NOTE: Une isocline doit passer par le point A

Contraintes sur les parois non chargées

$$\sigma_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad |\sigma_1| = N \cdot f / d$$



En comprimant avec une pointe dans la direction normale, on détermine le signe de la contrainte

Si $\sigma_1 > 0$ alors $(\sigma_1 - \sigma_2) \uparrow$

Si $\sigma_1 < 0$ alors $(\sigma_1 - \sigma_2) \downarrow$



Augmentation du nombre de franges

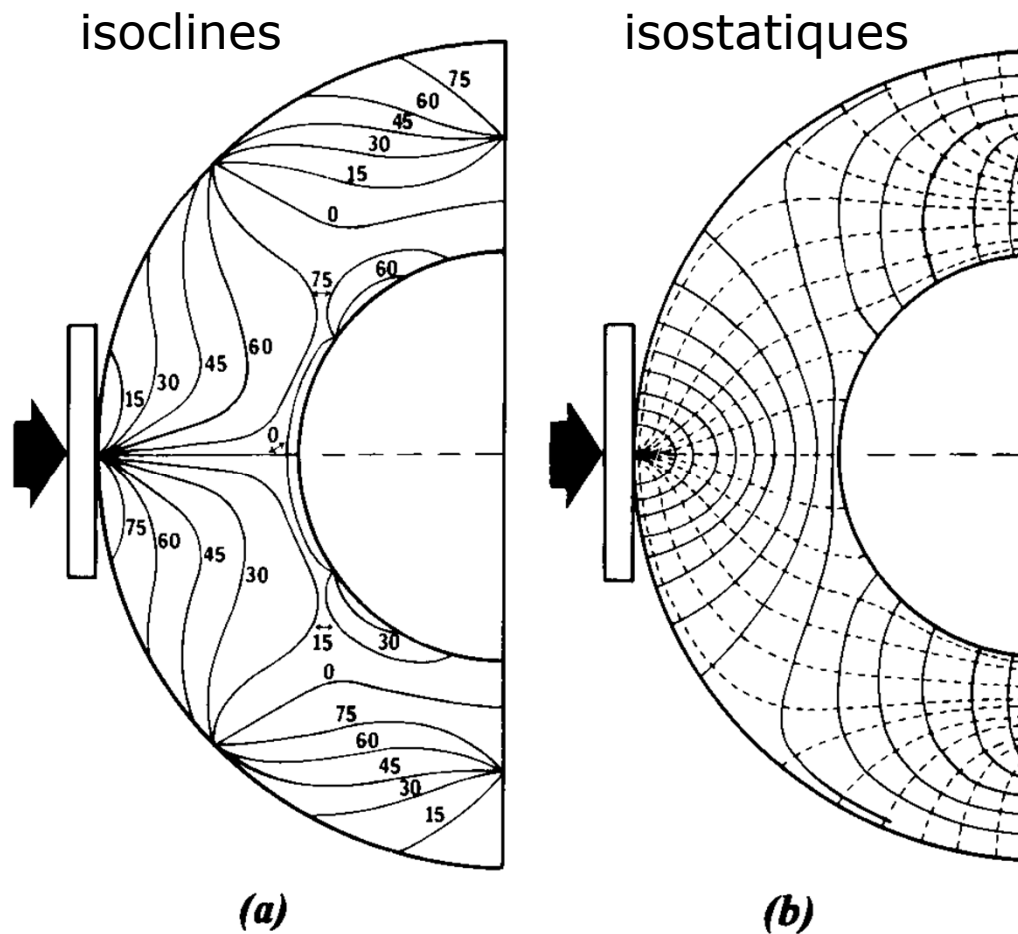


Diminution du nombre de franges

Les isostatiques

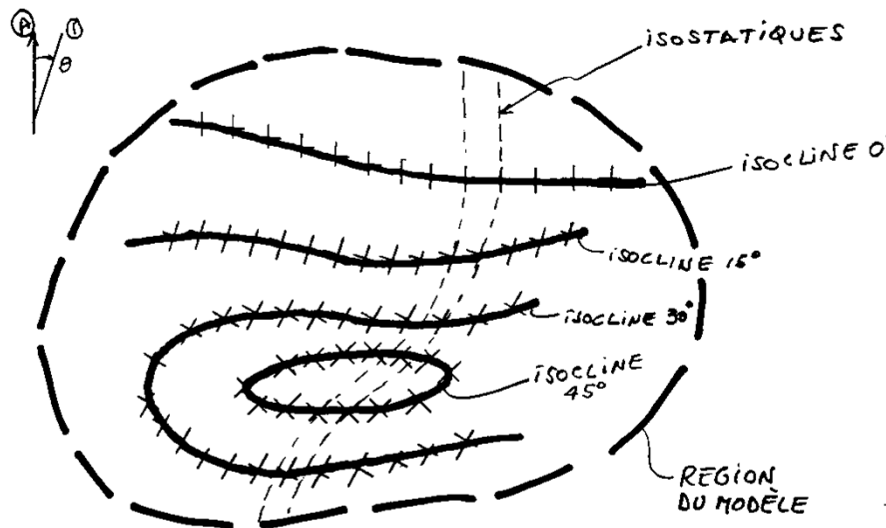
- Lignes de force tangentes aux directions principales.
- Deux familles orthogonales: une tangente à σ_1 et l'autre à σ_2
- Sont tracées à partir des isoclines
- Représentation visuelle de la propagation des contraintes dans une pièce
- Leurs courbures permettent de trouver le sens des variations des contraintes principales
- Elles servent à obtenir, par intégration, les valeurs séparées des contraintes principales

Isoclines et isostatiques



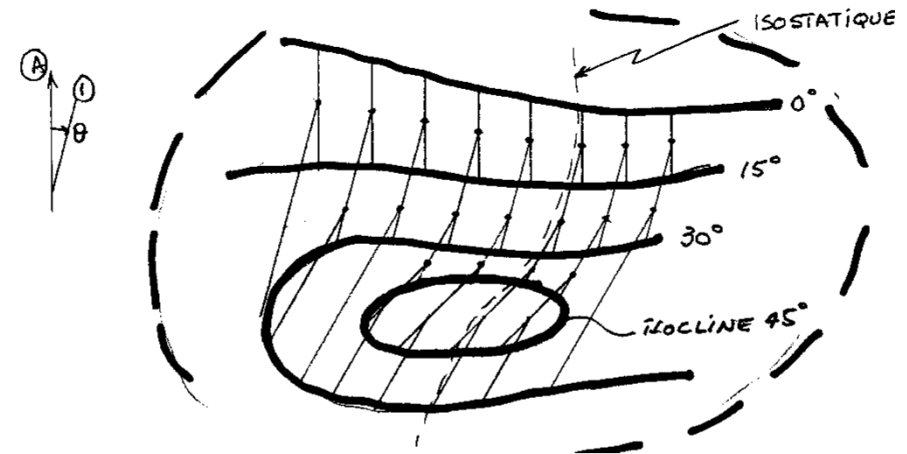
Traçage des isostatiques

Méthode rapide



Dessiner des petites croix orientées comme les axes P et A

Méthode plus précise

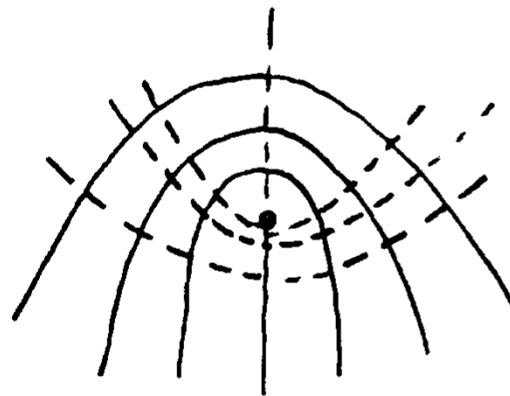


Points isotropiques

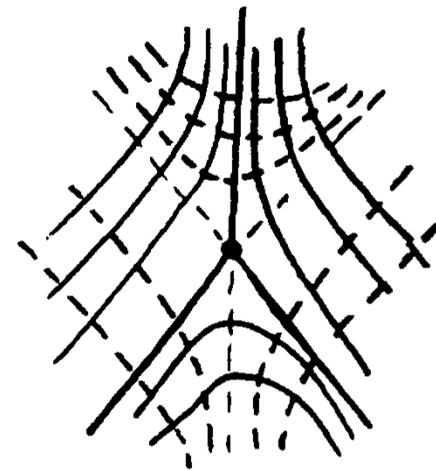
- À un point isotropique, les deux contraintes principales sont égales:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = 0$$

- Nous avons une frange noire
- Deux formes possibles des isostatiques autour de points isotropiques



ATTRACTIF



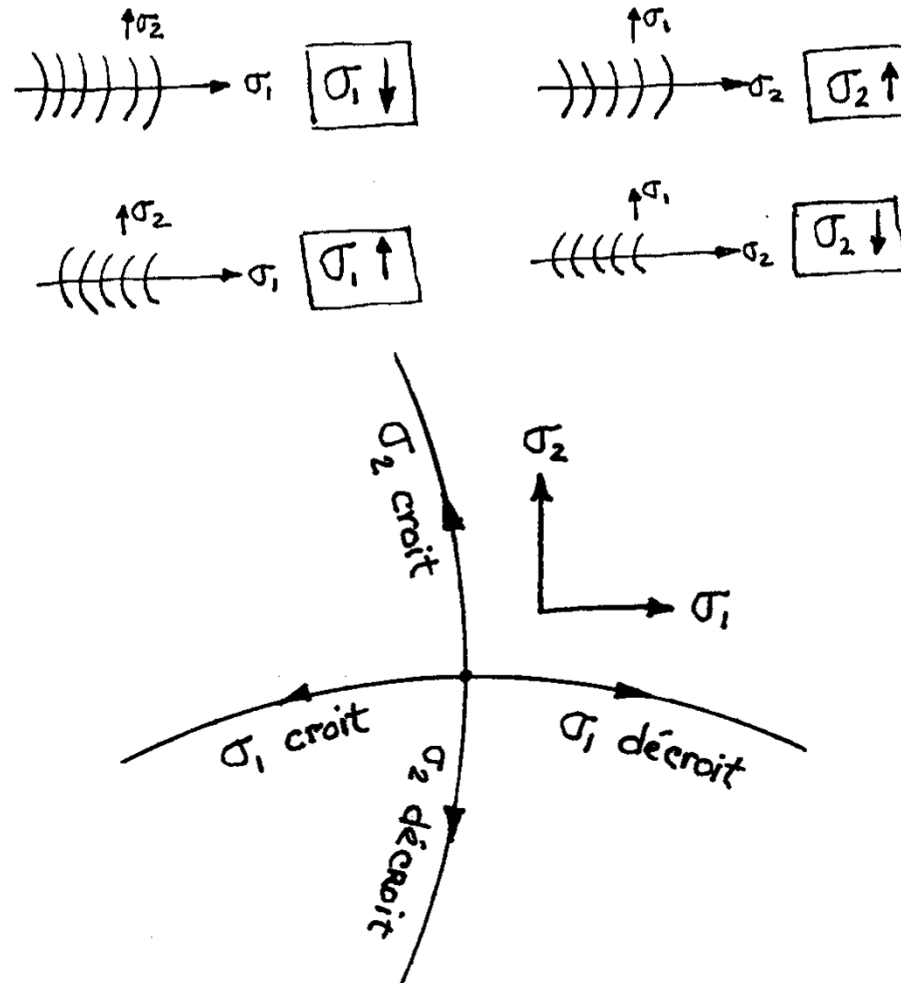
REPULSIF

Propriétés des isostatiques

- Lorsqu'une isostatique présente une forte courbure, la contrainte principale qui lui est perpendiculaire varie rapidement
- Lorsqu'une isostatique est rectiligne, la contrainte principale qui lui est perpendiculaire est stationnaire et est généralement soit maximale, soit minimale
- Une isostatique droite est aussi une isocline
- Les axes de symétrie sont des isostatiques
- La variation des contraintes dépend de la courbure des isostatiques

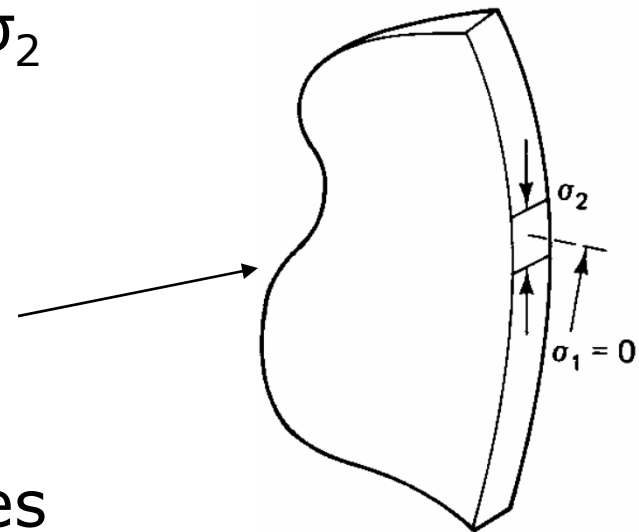
Variation des contraintes selon la courbure des isostatiques

$$\sigma_1 > \sigma_2$$



Séparation des contraintes

- Nécessaire pour trouver les valeurs individuelles de σ_1 et σ_2
- Évaluation directe sur un bord libre car une des contraintes normales est nulle
- Deux approches pour les autres endroits dans le modèle
 - L'incidence oblique
 - L'intégration des contraintes

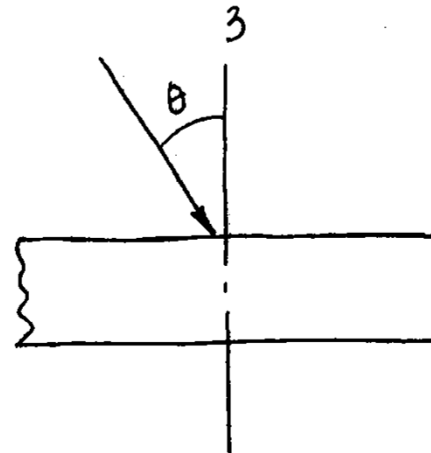
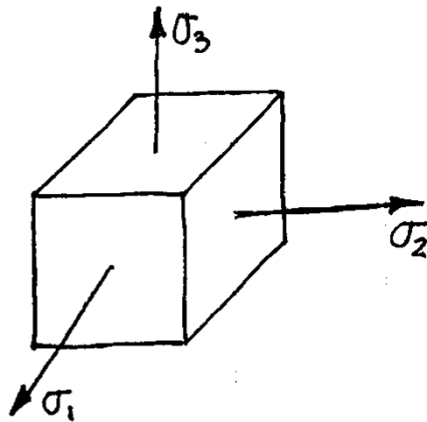


Incidence oblique (méthode expérimentale)

- $(\sigma_1 - \sigma_2)$ pour une incidence normale selon 3
- $(\sigma_1 - 0)$ pour une incidence selon 2 (impossible en pratique)
- Pour une incidence oblique (facile à réaliser):

$$A\sigma_1 - B\sigma_2 = \frac{N \cdot f}{d}$$

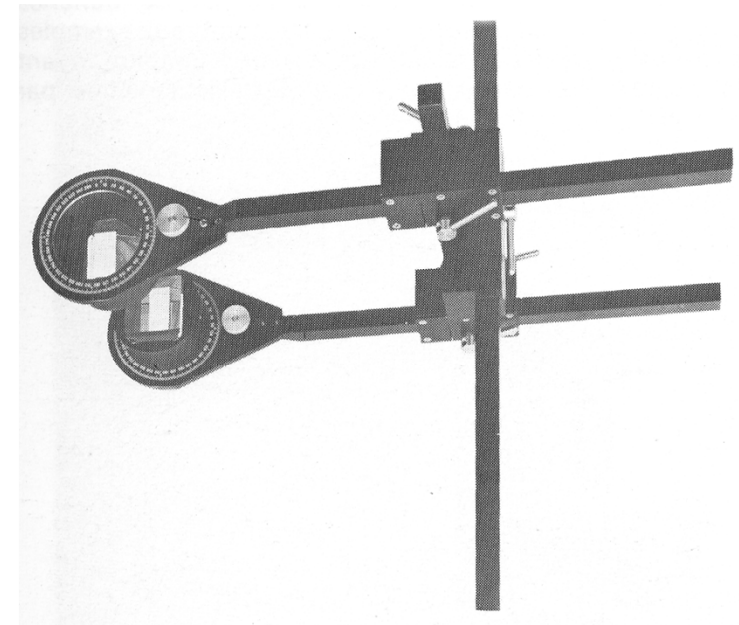
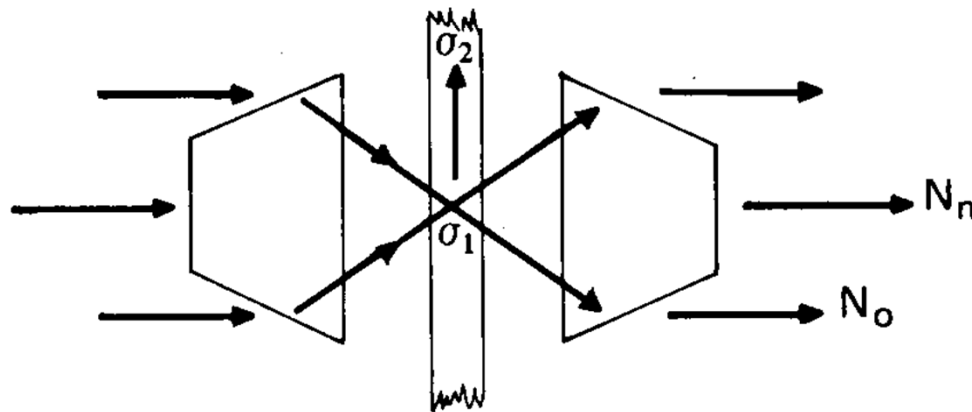
où A et B sont fonction de θ



Incidence oblique

$$\sigma_1 = \frac{C}{t \sin^2 \theta} (N_o \cos \theta - N_n)$$

$$\sigma_2 = \frac{C}{t \sin^2 \theta} (N_o \cos \theta - N_n \cos^2 \theta)$$



N_n incidence normale

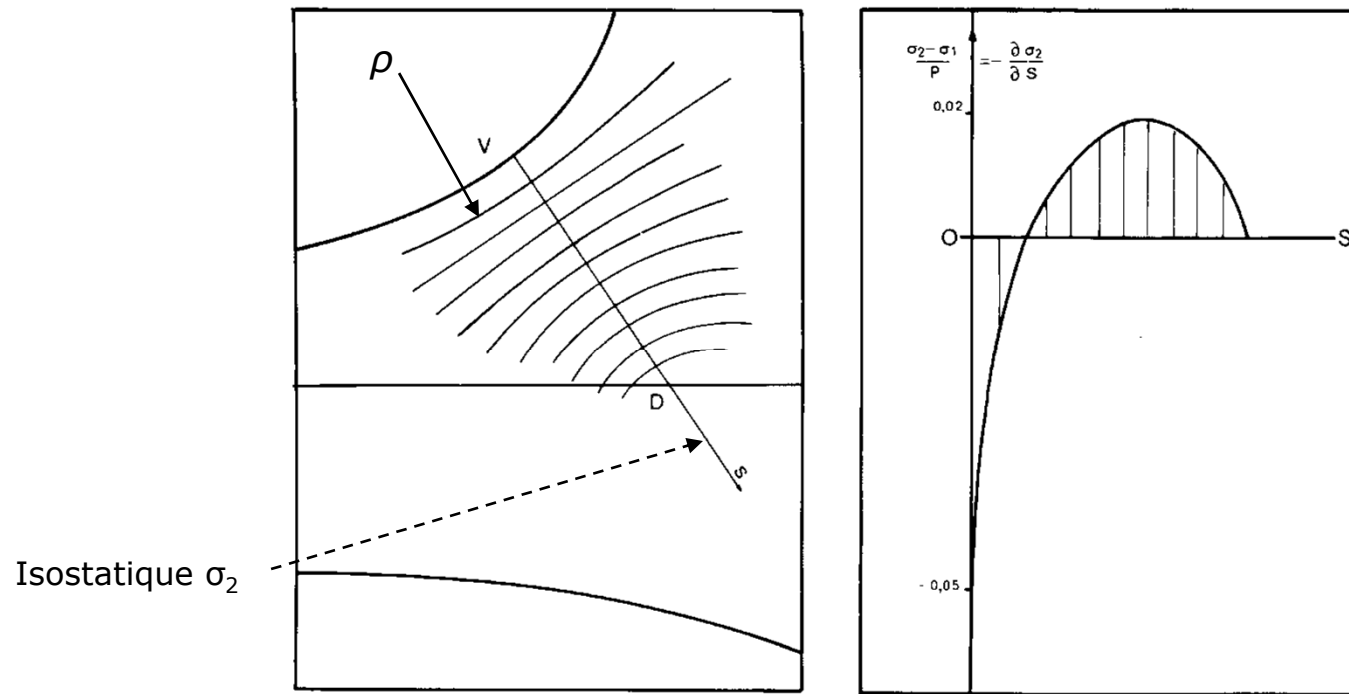
N_o incidence oblique

Méthodes de calcul

(pour la séparation des contraintes)

- Le principe fondamental consiste à intégrer les contraintes le long de lignes particulières
- Ce calcul est possible bien que nous n'ayons que deux mesures à chaque point:
 - L'angle des directions principales (isocline)
 - La différence des contraintes principales (isochrome)
- Il existe entre les paramètres d'un point et ceux de son voisinage, des réactions mutuelles qui sont définies par des relations d'équilibre
- Les relations d'équilibre sont basées sur les dérivées partielles des composantes de contraintes

Intégration le long d'une isostatique



$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial s} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\rho} = 0 \quad (\text{Lamé-Maxwell})$$

$$\sigma_2(s_i) = \int_0^{s_i} \frac{\partial \sigma_2}{\partial s} ds = \int_0^{s_i} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\rho} ds + C$$

Intégration le long d'une droite quelconque

Pour un état plan de contrainte

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\beta$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

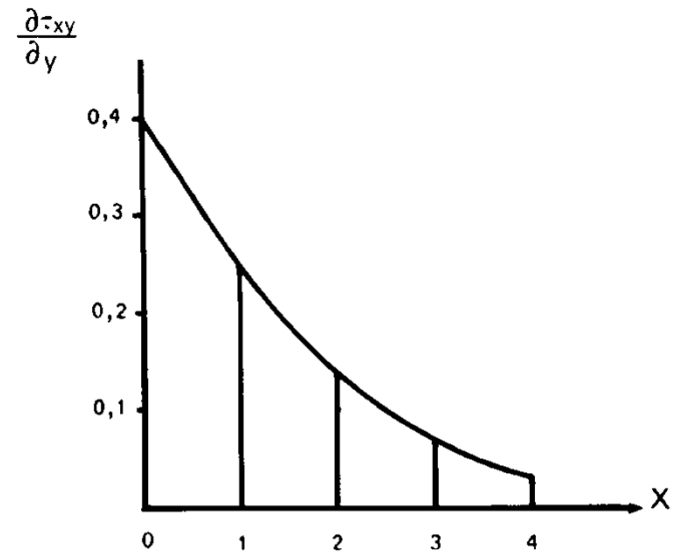
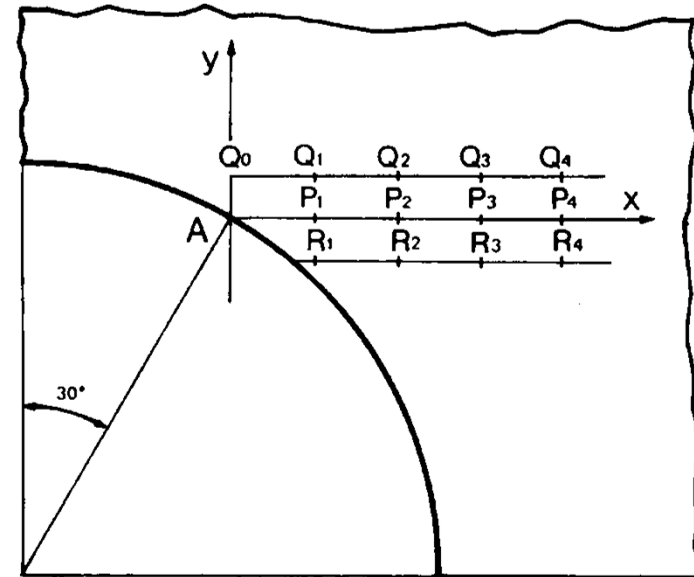
$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$$

En intégrant

$$\sigma_x(x_i) = \int_0^{x_i} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx = -\int_0^{x_i} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx + C$$

et

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \rightarrow (\sigma_1 + \sigma_2)$$

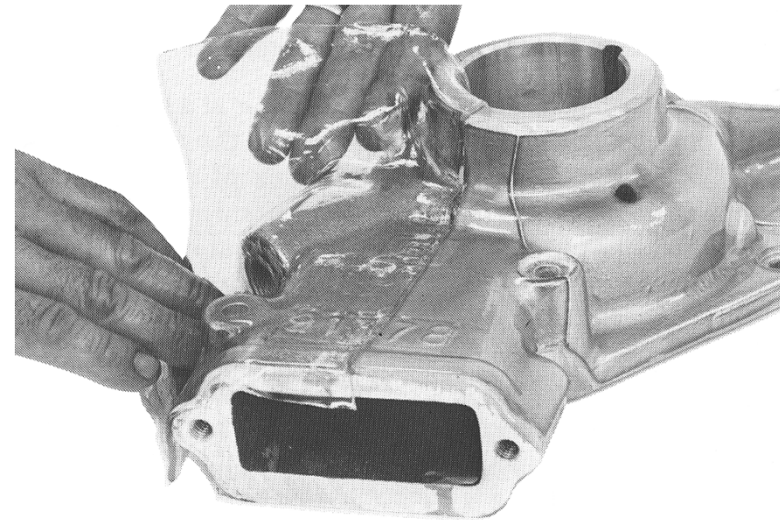


Photoélasticité par réflexion



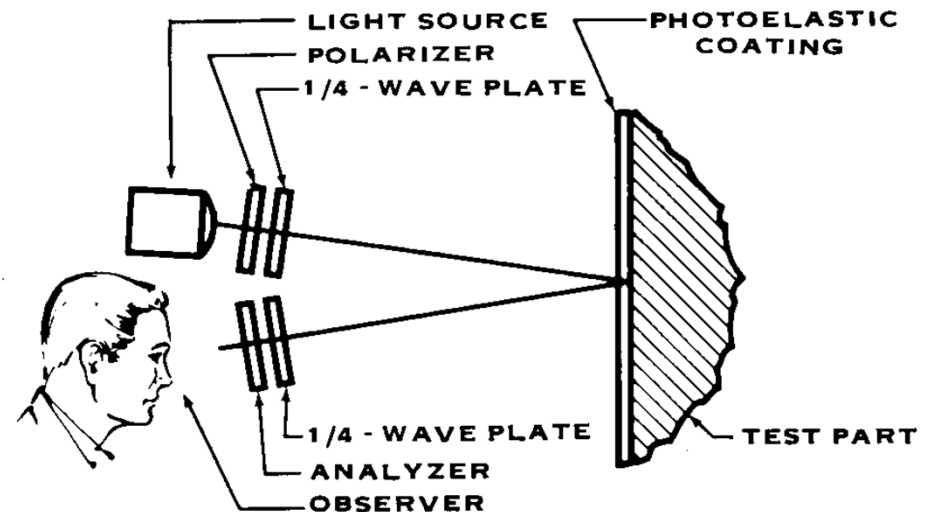
Description

- La photoélasticité par réflexion utilise des revêtements minces collés sur des structures réelles
- C'est la structure qui impose ses déformations au revêtement biréfringent
- On mesure donc des déformations qui sont converties en contraintes



Fonctionnement du polariscope à réflexion

- Un revêtement photoélastique est collée sur la surface de la pièce avec une colle réfléchissante à base de poudre d'aluminium
- La lumière incidente polarisée traverse deux fois le revêtement et génère des isoclines et des isochromes.



Exemples de polariscopes à réflexion

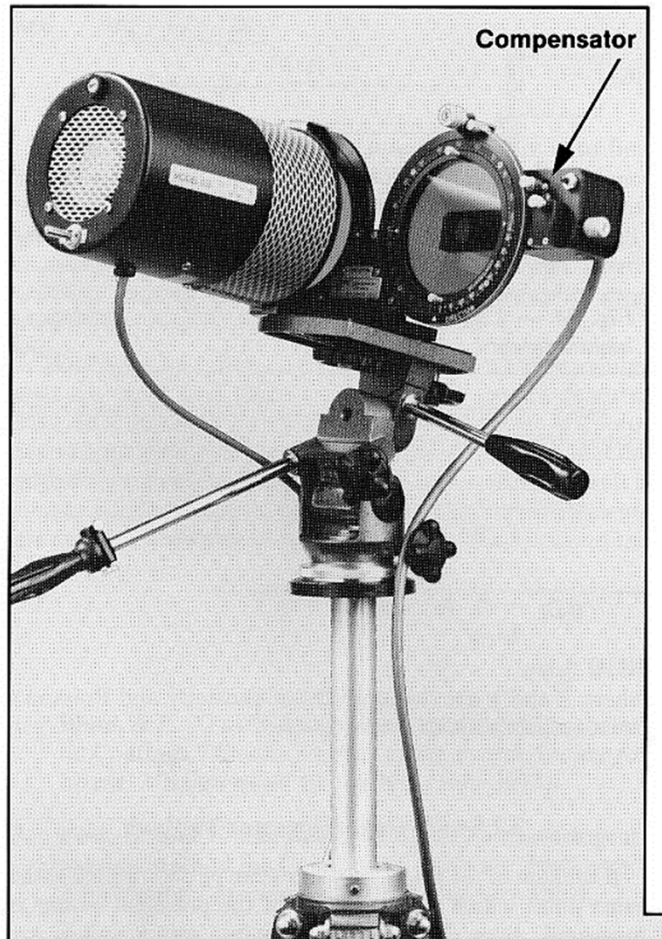
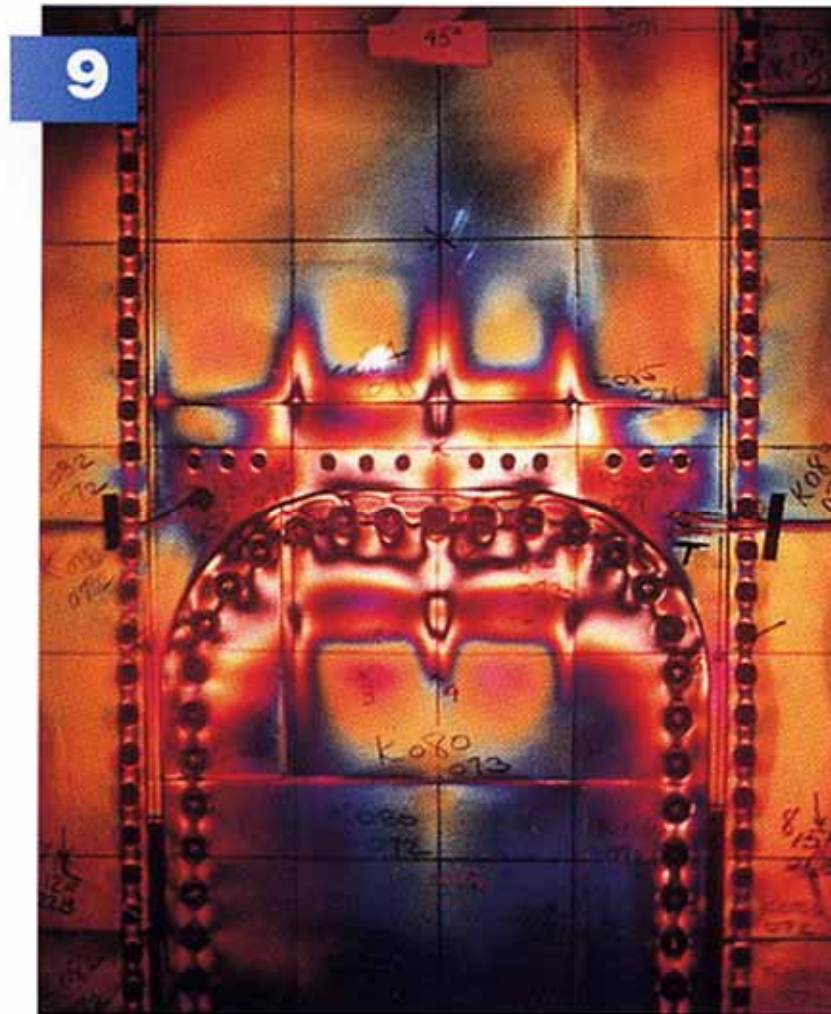


Fig. 22 — 040 Polariscopes with on-board electronics.

Exemple d'isochromes obtenues avec un polariscope à réflexion

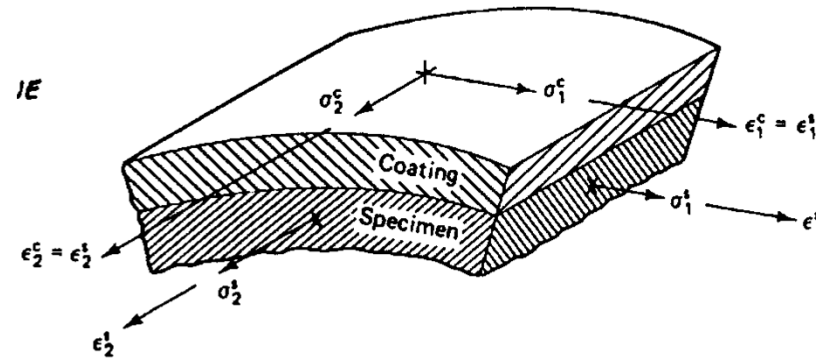


Relation entre les déformations de la pièce et les observations photoélastiques

$$\sigma_z^s = \sigma_z^c = \sigma_3 = 0$$

$$\varepsilon_1^c(x, y) = \varepsilon_1^s(x, y)$$

$$\varepsilon_2^c(x, y) = \varepsilon_2^s(x, y)$$



Dans le revêtement

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^c = \frac{1 + \nu^c}{E^c} (\sigma_1 - \sigma_2)^c = \frac{1 + \nu^c}{E^c} \cdot \frac{Nf}{2d}$$

Dans la pièce

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^s = \frac{1 + \nu^s}{E^s} (\sigma_1 - \sigma_2)^s$$

Donc $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^s = \frac{Nf}{2d} \cdot \frac{1 + \nu^c}{E^c}$

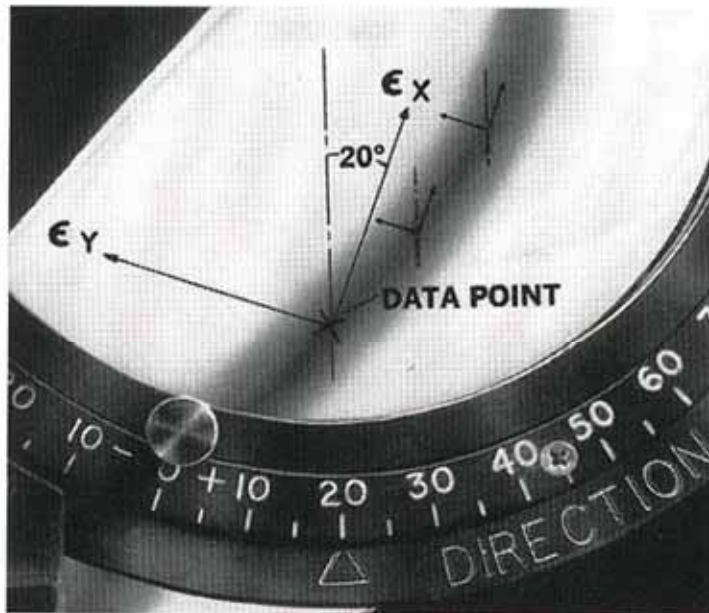
Pour une pièce dans le domaine élastique

$$\left(\frac{1+\nu^s}{E^s}\right)(\sigma_1 - \sigma_2)^s = \frac{Nf}{2d} \cdot \left(\frac{1+\nu^c}{E^c}\right)$$

D'où

$$\boxed{(\sigma_1 - \sigma_2)^s = \frac{1+\nu^c}{1+\nu^s} \cdot \frac{E^s}{E^c} \cdot \frac{Nf}{2d}}$$

Mesure des contraintes avec un compensateur



Measurement of stress direction.



Measurement of stress magnitude*

Matériaux des revêtements

- Les époxydes ont une bonne sensibilité et se galbent facilement;
- Les polycarbonates sont très sensibles mais ne peuvent être utilisés que sur des surfaces planes;
- Les polyuréthanes sont réservés au recouvrement des matériaux mous car ils ont un faible module d'élasticité

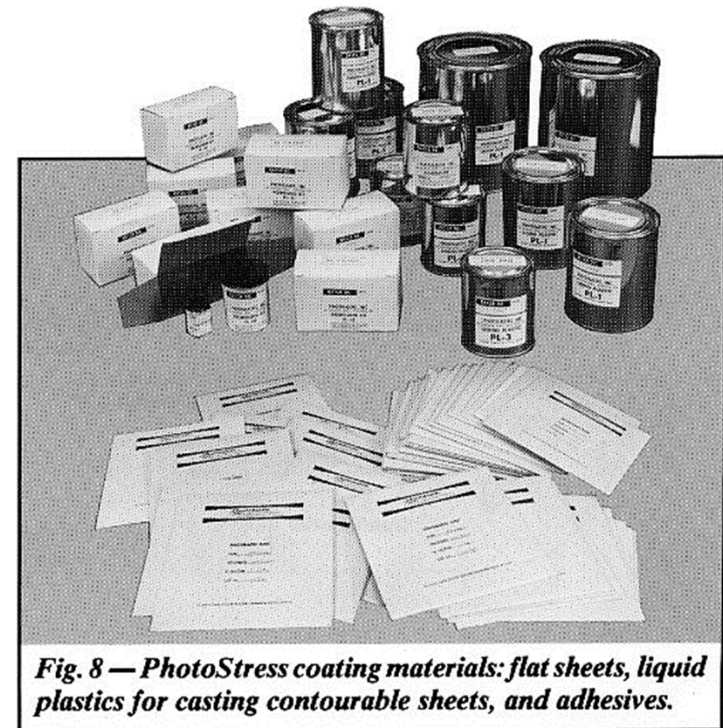
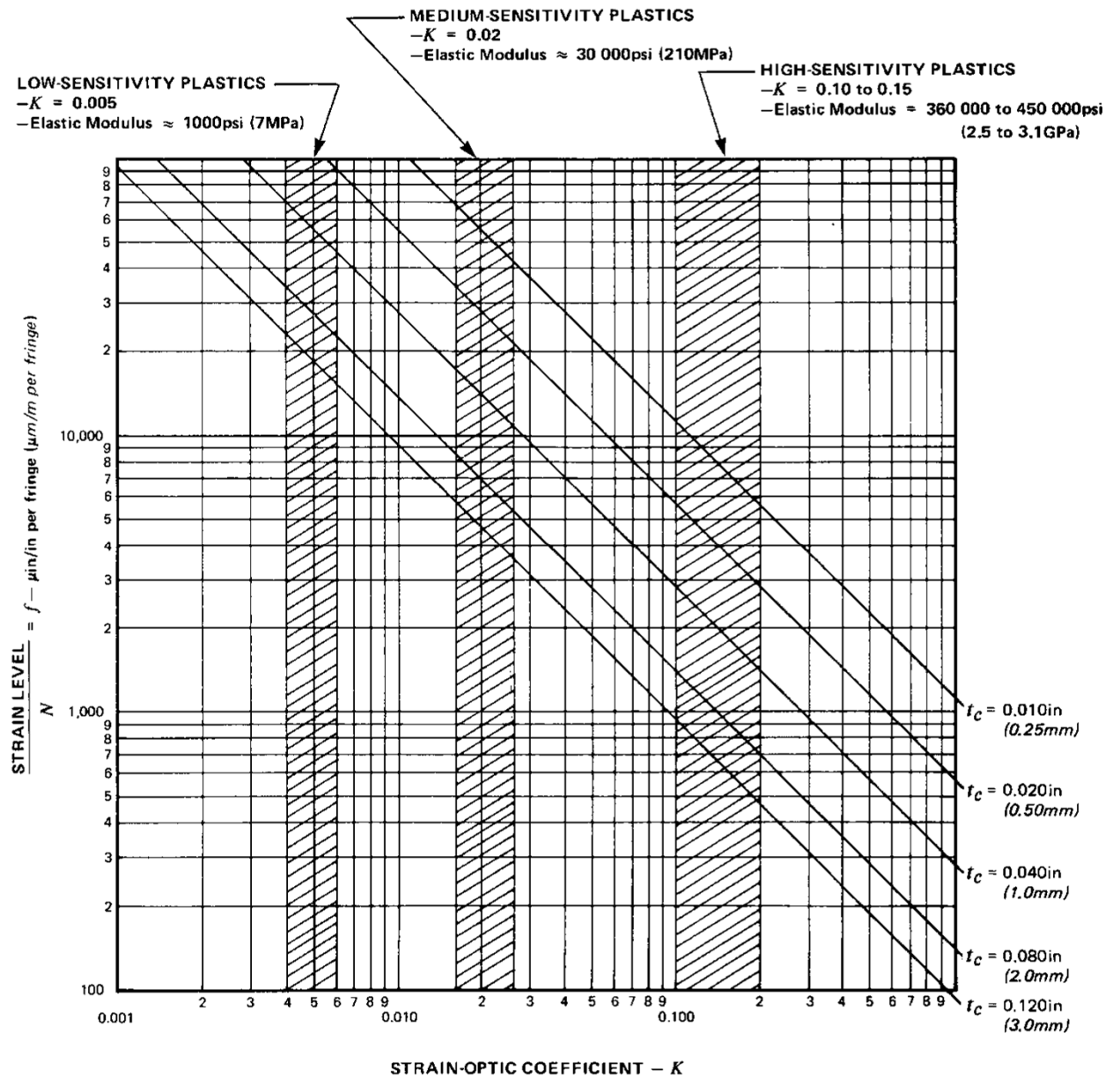


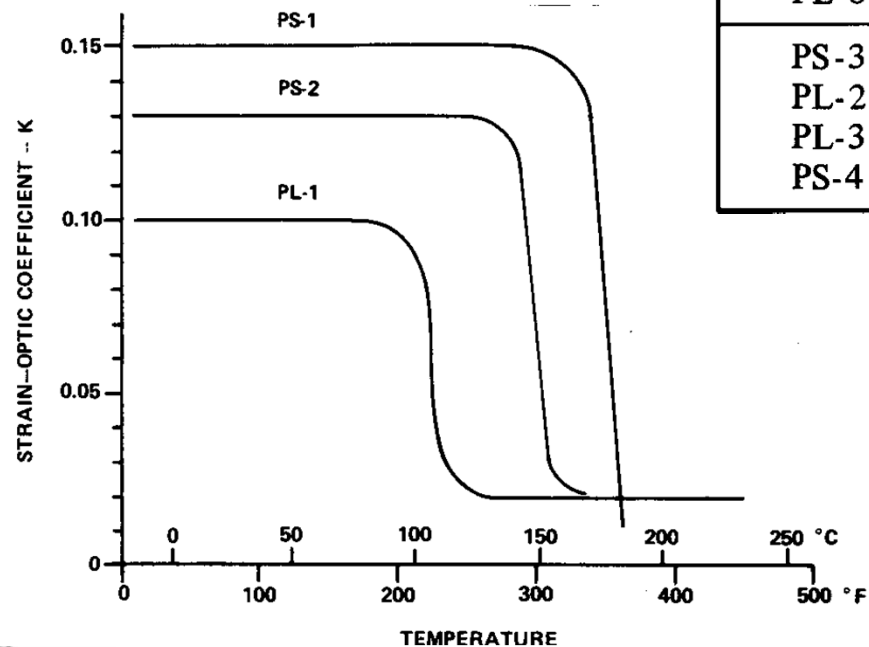
Fig. 8 — PhotoStress coating materials: flat sheets, liquid plastics for casting contourable sheets, and adhesives.

Sensibilité des revêtements

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^c = \frac{\lambda N}{2 d K}$$



Déformations maximales et effet de la température

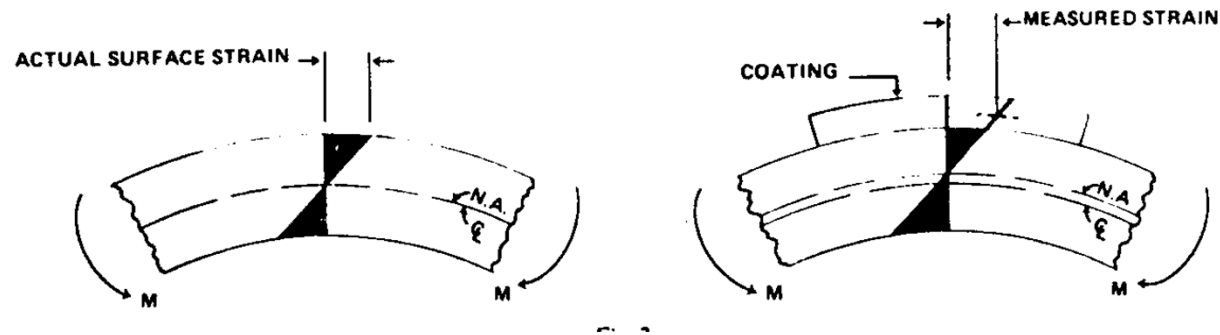


COATING MATERIAL	MAXIMUM ELONGATION	TYPICAL APPLICATION
PS-1	10%	Testing on metals, concrete, glass, and hard plastics in the elastic and elastoplastic ranges
PS-2	3%	
PS-8	3%	
PL-1	3%	
PL-8	3%	
PS-3	30%	Testing on soft materials such as rubber, plastics, and wood
PL-2	50%	
PL-3	110%	
PS-4	150%	

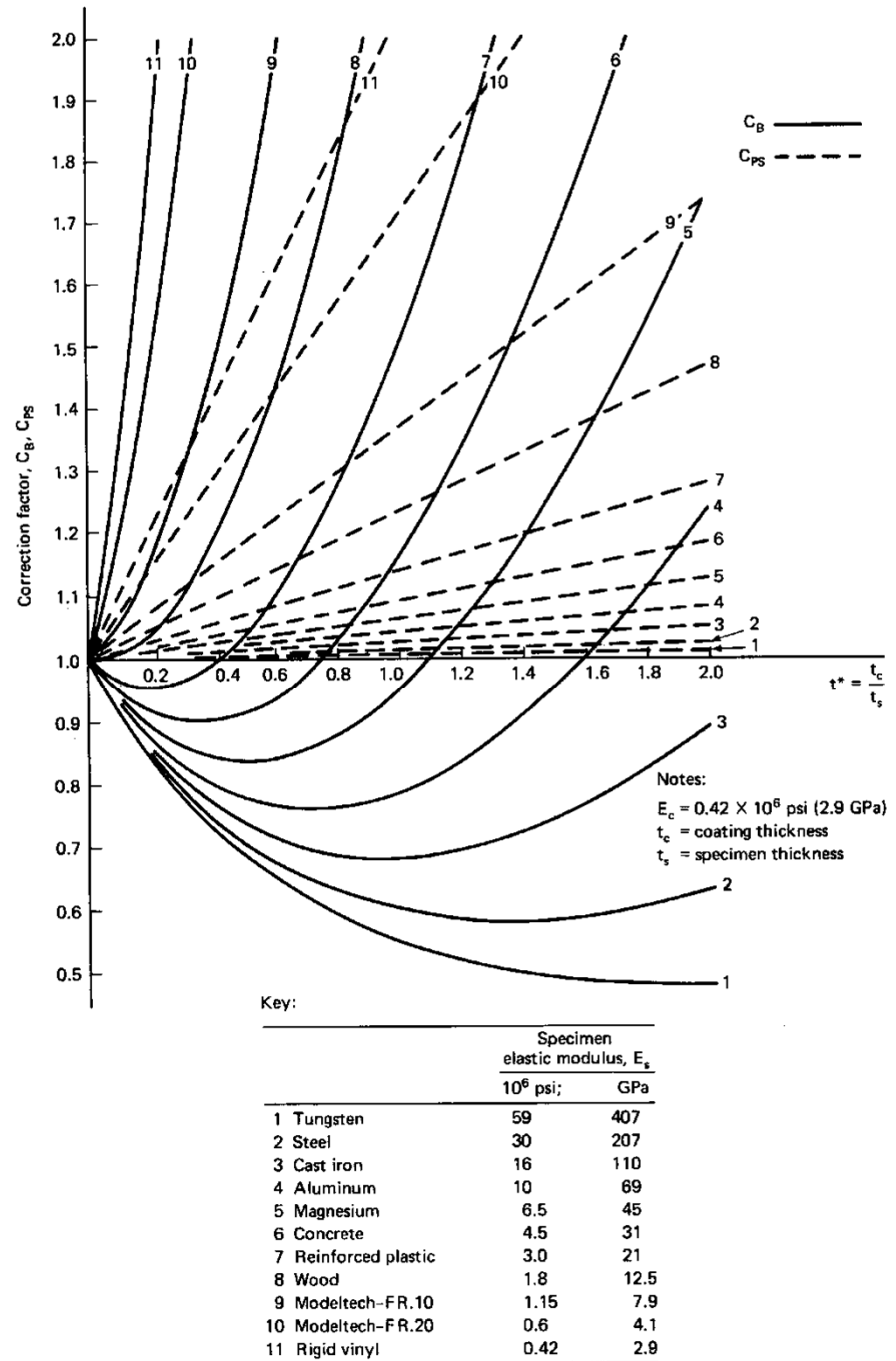
Effets de renforcement

État plan de contrainte: $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^S = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^C \cdot C_{ps}$

Flexion: $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^S = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^C \cdot C_B$



Facteurs de correction pour l'effet de renforcement



Séparation des contraintes



Fig. 23 — Oblique-Incidence Adapter, attached to 030 Series Polariscopes.

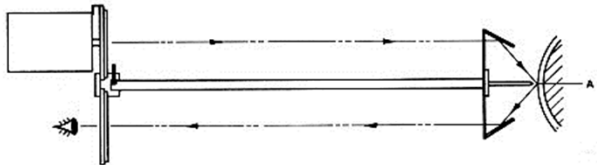


Fig. 24 — Light path employed for oblique-incidence measurements.



Fig. 25 — PhotoStress Separator Gage

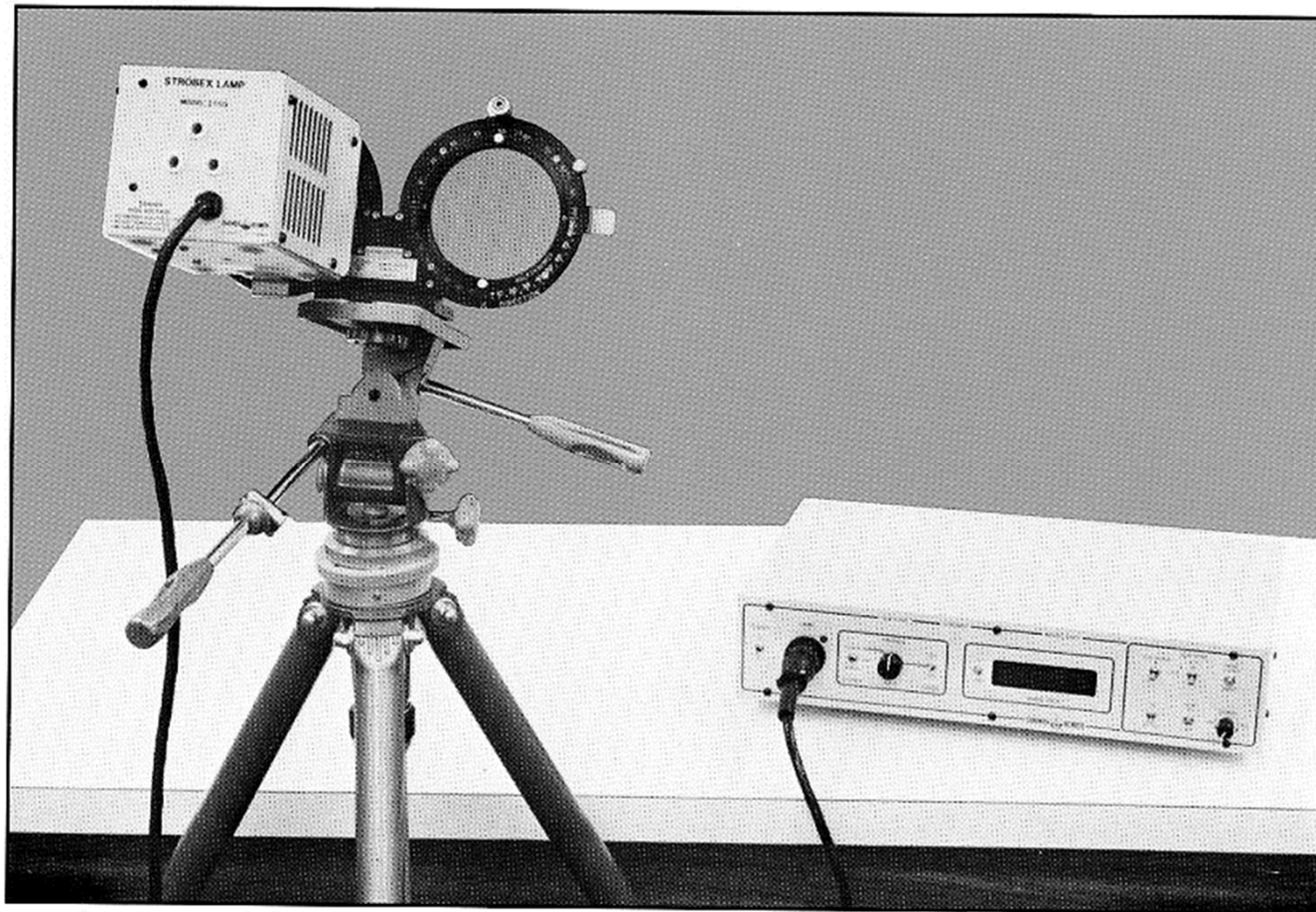
Adding to, and subtracting from, the measurement of the difference of principal strains,

$$\begin{aligned} \epsilon_x - \epsilon_y &= N_N f \\ \epsilon_x + \epsilon_y &= 2S_G \\ \epsilon_x &= S_G + \frac{N_N f}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

and

$$\begin{aligned} \epsilon_x - \epsilon_y &= N_N f \\ -\epsilon_x - \epsilon_y &= -2S_G \\ \epsilon_y &= S_G - \frac{N_N f}{2} \end{aligned} \quad (20)$$

Mesures dynamiques avec lumière stroboscopique (chargement cyclique)



Conclusions

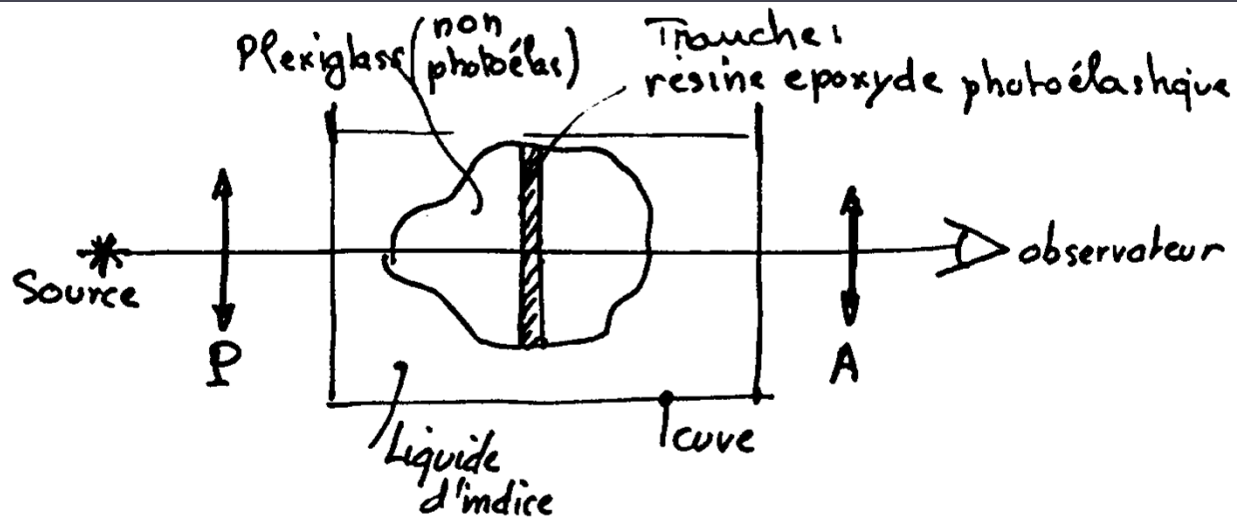
- Contrairement à la photoélasticimétrie 2D et 3D sur modèles transparents, la méthode des revêtements photoélastiques est encore utilisée dans l'industrie car elle présente plusieurs avantages:
 - C'est une méthode de champ qui se pratique sur les structures réelles
 - Sa mise en œuvre est relativement facile
 - Des progrès sont faits régulièrement dans le domaine des revêtements, des colles et des instruments
 - Depuis quelques années on assiste à l'introduction de l'assistance informatique, notamment pour l'analyse et l'interprétation des images.

Photoélasticité 3D par transmission

(pas au programme)

- Permet d'obtenir les contraintes à n'importe quel endroit d'un modèle chargé ou d'un modèle à contraintes figées
- N'est que très rarement utilisée de nos jours car la mise en œuvre est complexe et coûteuse
- A été remplacée par des méthodes de calcul numériques comme les éléments finis
- Demeure intéressante pour connaître les principes mis en cause

Méthode des tranches incluses



- Modèle constitué d'un matériau non photoélastique (plexiglas) sauf dans une région, où l'on colle une tranche mince d'un matériau photoélastique
- La difficulté majeure réside dans l'obtention d'une bonne adhésion de la tranche au reste du modèle

Méthode du figeage

- Modèle de matière photoélastique (mélange d'époxydes)
- Le chargement est appliqué dans un four à environ 120°C
- Par la suite, on le refroidit très lentement tout en conservant le chargement. À température ambiante, on enlève le chargement.
- Le modèle conserve alors dans sa matière, les biréfringences proportionnelles aux contraintes subites

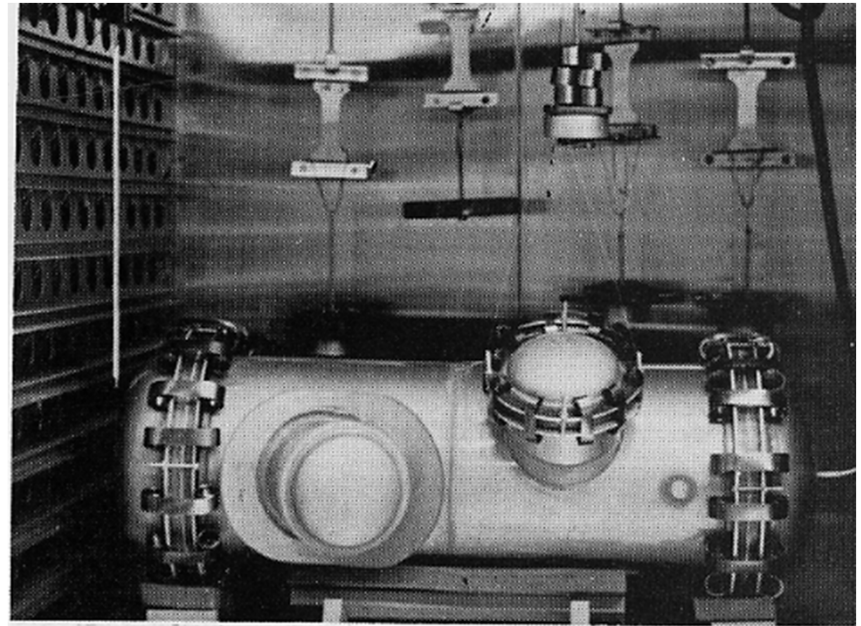


Fig 21 - Figeage d'une enceinte sous pression.

Mesures des contraintes, modèle 3D

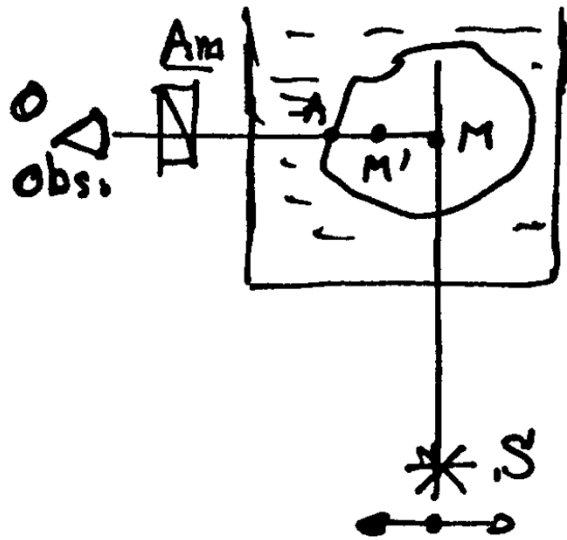
- Utilisation la lumière diffusée

ou bien

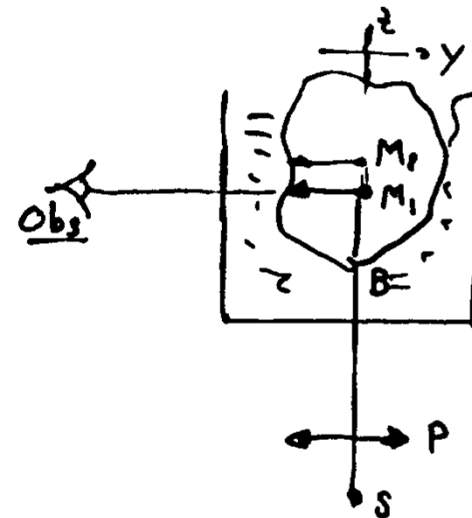
- Découpage du modèle en tranches minces que l'on étudie par photoélasticimétrie 2D.
- Les mesures effectuées sur des tranches d'orientations différentes permettent de reconstituer l'état de contrainte 3D (Très délicat à réaliser)

Méthode de la lumière diffusée

La lumière diffusée perpendiculaire à la trajectoire du rayon incident est polarisée plane. Le modèle devient un polaroïd fictif.



Polaroïd fictif utilisé comme polariseur



Polaroïd fictif utilisé comme analyseur

Chap. 6



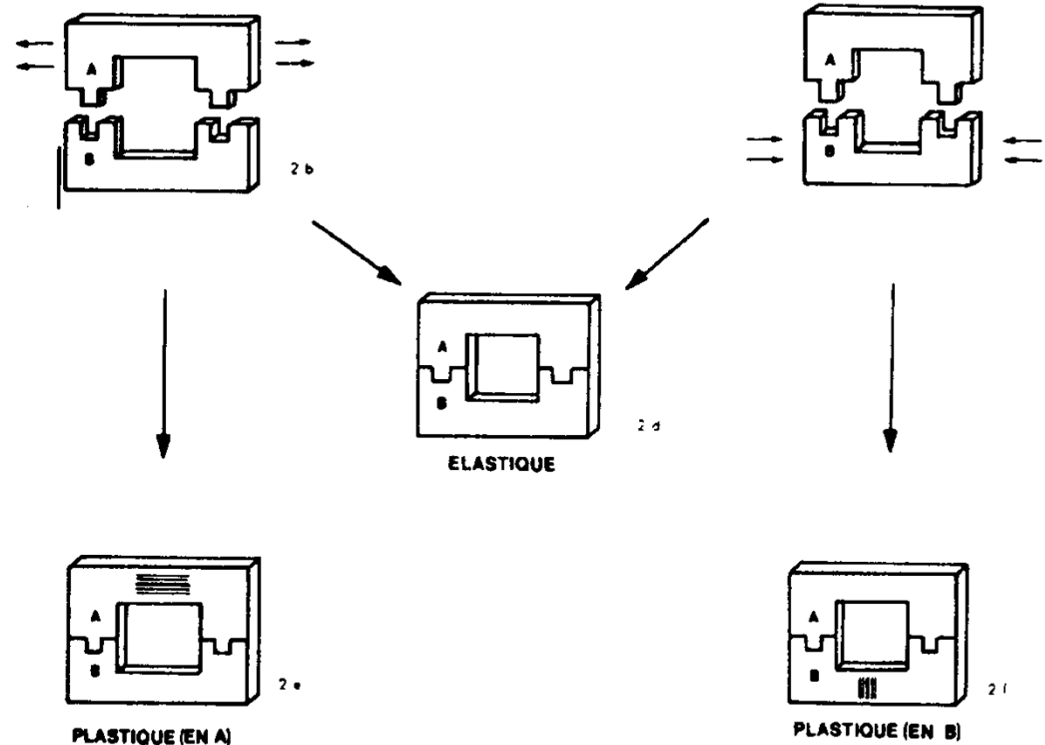
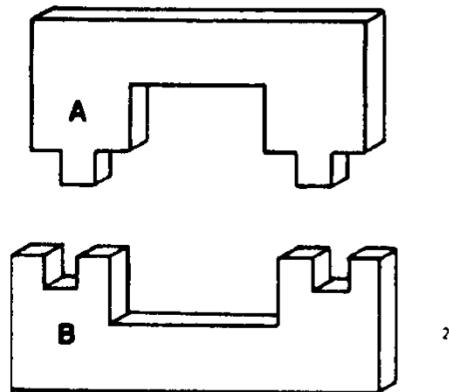
Autres méthodes

Les contraintes résiduelles

- Sont le résultat des processus de fabrication (ex. laminage, pliage, soudage, forgeage, etc.)
- Généralement mesurées par relâchement en découpant ou en enlevant de la matière (méthodes destructives)
 - Limage, sciage, usinage
 - Découpage au jet d'eau, attaque chimique, électro-usinage
 - Carottage, perçage (méthode du trou)

Exemples de contraintes internes s'équilibrant élastiquement ou créant des déformations permanentes

L'extensométrie mesure les contraintes internes mais pas les déformations plastiques



Mesure par découpage (avec jauges)

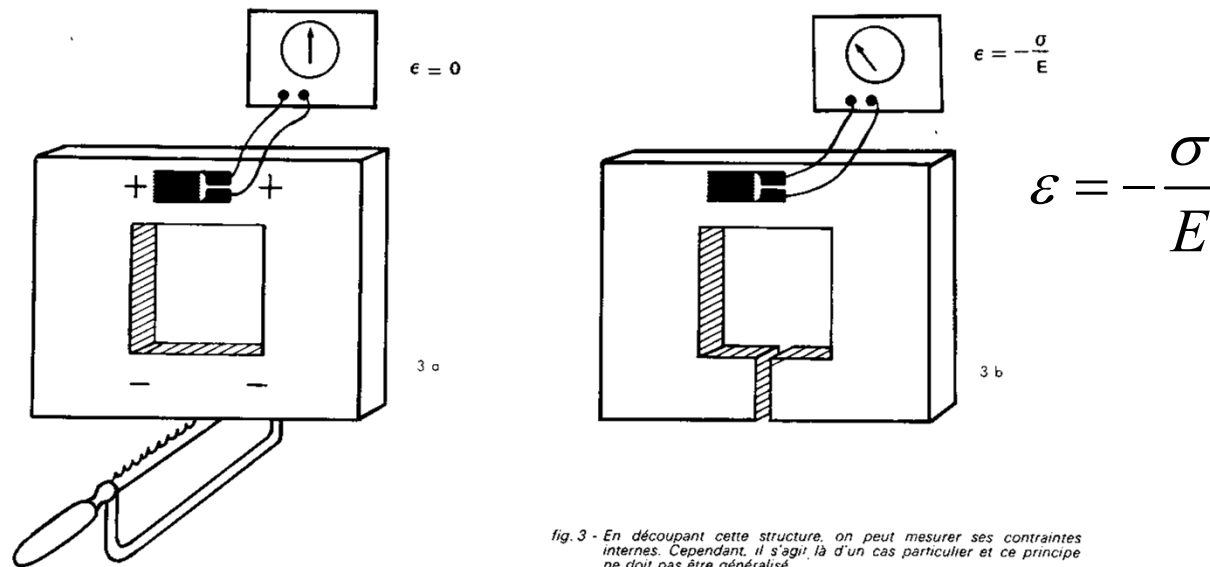


fig. 3 - En découpant cette structure, on peut mesurer ses contraintes internes. Cependant, il s'agit là d'un cas particulier et ce principe ne doit pas être généralisé.

Méthode des trous

- Simple de réalisation (perçage d'un petit trou)
- Basée sur la théorie de l'état biaxial de contrainte
- Les inconnues sont: σ_1 , σ_2 , β (*angle direction principale*)
- Demande trois mesures radiales sur le bord du trou dans des directions différentes (rosette spéciale)

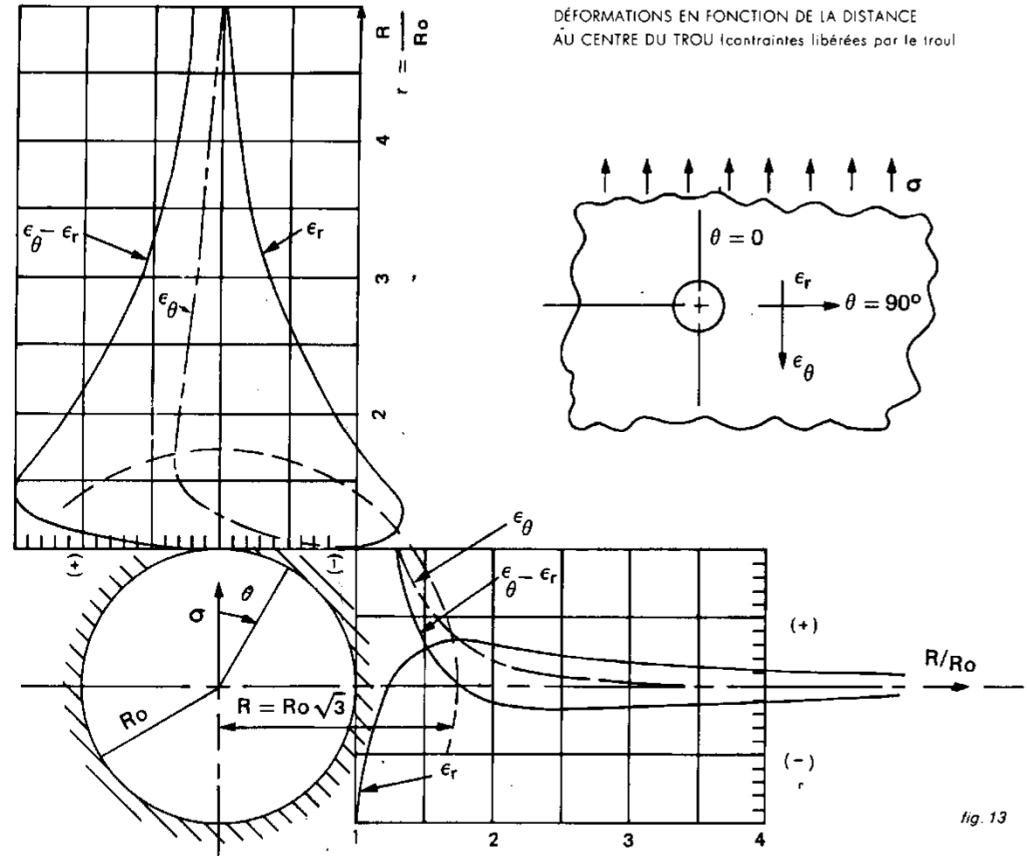
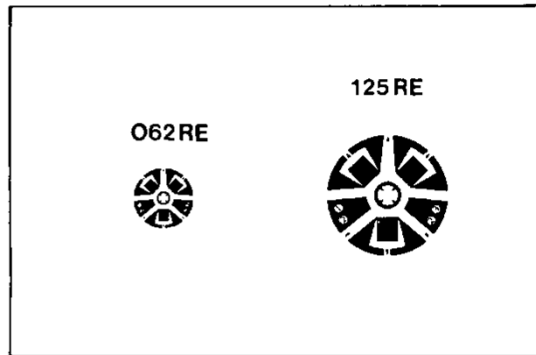
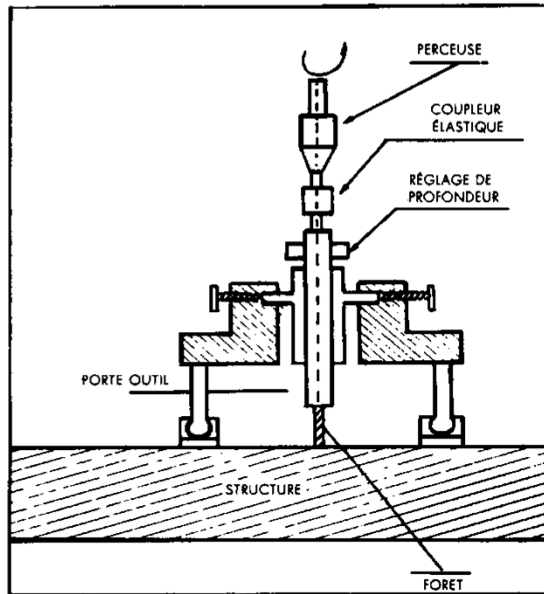
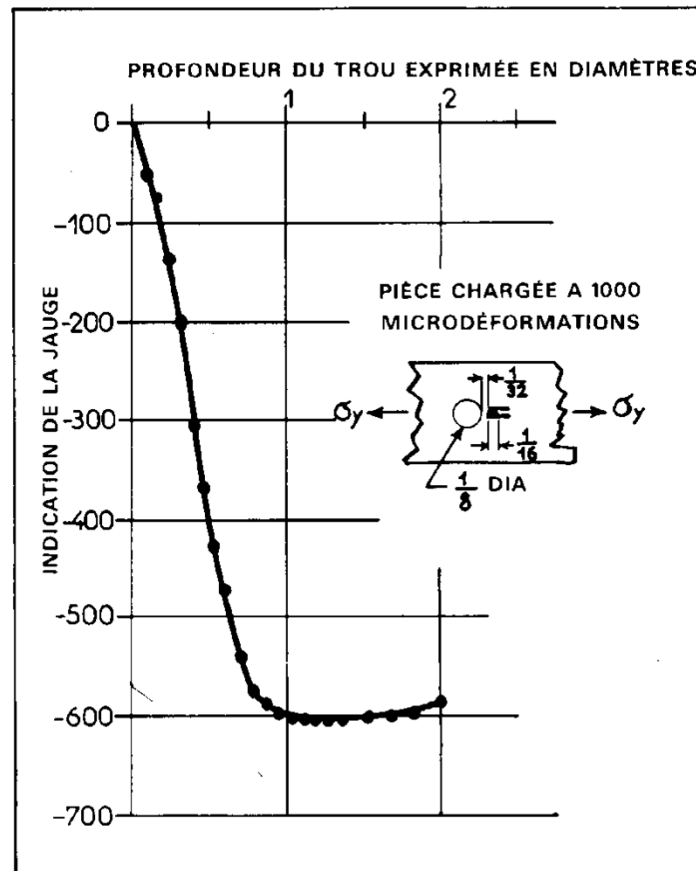


fig. 13

Les déformations sont maximales sur le bord du trou mais elles sont sensibles aux imperfections (excentricité)

Profondeur de forage



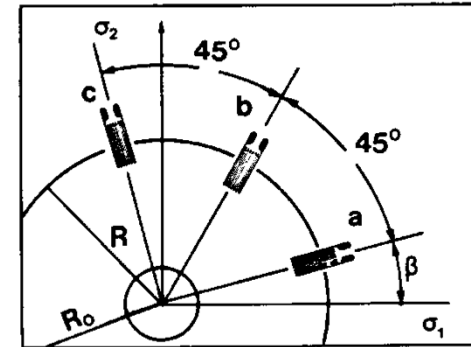
- Relâche toutes les contraintes à une profondeur de 1.2 diamètre
- Forage par étape pour connaître le gradient des contraintes

État de contraintes principal

$$\operatorname{tg} 2 \beta = \frac{\epsilon_a - 2 \epsilon_b + \epsilon_c}{\epsilon_a - \epsilon_c}$$

$$\sigma_1 = \frac{(A + B \sin 2 \beta) \epsilon_a - (A - B \cos 2 \beta) \epsilon_b}{2 AB (\sin 2 \beta + \cos 2 \beta)}$$

$$\sigma_2 = \frac{(A + B \cos 2 \beta) \epsilon_b - (A - B \sin 2 \beta) \epsilon_a}{2 AB (\sin 2 \beta + \cos 2 \beta)}$$



Les coefficients A et B varient en fonction du:

- Matériau
- Diamètre du trou

$$4A = - \frac{(1 + \mu) \varnothing^2}{2 E R^2}$$

$$4B = - \frac{2 \varnothing^2}{E R^2} + \frac{3 (1 + \mu) \varnothing^4}{8 E R^4}$$

Examen final

- Date: Lundi le 10 décembre
- Période: 12h45 à 15h15
- Durée: 2h30
- Local: A-552 (Classe habituelle)
- Pondération: 50% de la note totale
- Documentation: Aucune permise sauf une seule feuille de notes manuscrites de format légal (8½" x 14", voir plan de cours pour plus de précision)
- Formulaire complet annexé au questionnaire qui est sera également disponible sur le site Internet du cours deux semaines avant l'examen.

Examen final (suite)

- Les questions seront basées sur les objectifs spécifiques du plan de cours et comprendront:
- ~50% de problèmes
 - (similaires à ceux résolus en laboratoire)
- ~50% de questions sur les connaissances
- Un document donnant plus de précisions sera bientôt disponible sur le site Internet du cours