

# GLASTECHNISCHE BERICHTE

ZEITSCHRIFT FÜR GLASKUNDE

Herausgegeben von der

DEUTSCHEN GLASTECHNISCHEN GESELLSCHAFT E.V.

Nachdruck nur mit ausdrücklicher Genehmigung der Schriftleitung gestattet.

46. Jahrgang

Februar 1973

Heft 2

DK 658.562.6:620.179.15:535.327.3:666.15:621.928.1

## Examen global et sélection automatique des feuilles de verre sur base de la déviation optique

Von GEORGES DE CLERCK, Jumet (Belgien)

(Vortrag auf der 46. Glastechnischen Tagung am 7. Juli 1972 in Wiesbaden)

(Mitteilung aus dem Laboratoire Central, S. A. Glaverbel, Jumet (Belgien))

(Eingegangen am 15. Mai 1972)

SCHARDIN et TÖPLER ont réalisé et décrit des dispositifs de détermination de la déviation optique des vitrages. Ces appareils permettent d'examiner des surfaces importantes et permettent une analyse du champ de déviation optique complète du vitrage, contrairement aux autres méthodes qui ne permettent qu'un examen le long d'une ligne d'exploration.

Ces appareils d'examen global fonctionnent habituellement en lumière parallèle et comportent de ce fait deux miroirs concaves sphériques dont le périmètre délimite également la zone examinée en une seule opération. On a étudié un dispositif à un seul miroir, fonctionnant en lumière divergente, et a déterminé théoriquement l'erreur intro-

duite par la divergence du faisceau ainsi que le seuil de sensibilité d'un montage de ce type. Cette étude a permis de dégager des limites pratiques de construction d'un appareil dont l'erreur de mesure est inférieure à une limite industriellement acceptable. Cet appareil a été construit et se prête particulièrement bien au contrôle rapide de la déviation optique des vitrages, conformément aux cahiers des charges particuliers des constructeurs d'automobiles. Ce dispositif convient également pour le contrôle de la déviation optique des pare-brise finis. Enfin, l'appareil réalisé se prête aisément à l'automatisation.

### Overall examination and automatic selection of glass sheets based on optical deviation

SCHARDIN and TÖPLER have produced and described apparatus for determining the optical deviation in sheets of glass. These methods allow examination of large sheets and analysis of the complete field of optical deviation, unlike other methods which can only scan along one particular line.

These methods for the examination of the whole sheet usually work in parallel light using two spherical mirrors the size of which determines the size of the object that can be examined in one operation. In the present work an apparatus using only one mirror and divergent light has been studied. The error introduced by the divergence of the

beam and the limit of sensitivity of such an apparatus have been determined theoretically. This study has shown the practical limits for the construction of an apparatus having an error of measurement less than the standard acceptable in industry. An apparatus has been constructed which is particularly suitable for the rapid examination of optical deviation of window panels for conformity to automobile manufacturers standards. The apparatus is also suitable for examination of optical deviation in finished windshields. Finally, the apparatus developed is easily automated.

### Globale Prüfung und automatische Sortierung von Glastafeln auf Grund optischer Störungen

SCHARDIN und TÖPLER haben Einrichtungen zur Bestimmung optischer Störungen an Flachglas entwickelt und beschrieben. Mit ihrer Hilfe können Oberflächen, an die besondere Ansprüche gestellt werden, geprüft und eine Analyse der vorhandenen optischen Störungen über die gesamte Scheibe durchgeführt werden. Die Methoden stehen im Gegensatz zu anderen, die nur eine linienförmige Prüfung erlauben.

Die Vorrichtungen zur globalen Prüfung arbeiten gewöhnlich mit parallelem Licht und benutzen deshalb zwei konkave sphärische Spiegel, deren Umfang zugleich den in einem Schritt überprüfaren Bereich begrenzt. In der vorliegenden Arbeit wurde eine mit nur einem Spiegel und divergentem Licht arbeitende Vorrichtung erprobt. Der

durch die Divergenz des Lichtbündels auftretende Fehler und die Empfindlichkeitsschwelle eines solchen Gerätes wurden berechnet. Die Erprobung erlaubte es, die für die Konstruktion erforderlichen Grenzwerte für ein Gerät zu ermitteln, dessen Meßfehler unterhalb eines industriell annehmbaren Grenzwertes liegt. Ein inzwischen aufgebautes Gerät eignet sich besonders gut zur Schnellprüfung optischer Störungen an Flachglasscheiben und entspricht den in den Lastenheften der Automobilhersteller aufgestellten Forderungen. Die Prüfeinrichtung eignet sich ebenso für die Kontrolle optischer Störungen an fertigen Windschutzscheiben. Außerdem läßt sie sich auch für automatisch arbeitende Prüfeinrichtungen einsetzen.

Le contrôle de la qualité optique des vitrages destinés à équiper les véhicules est une opération coûteuse.

En effet, tous les pays ont élaboré des normes de

sécurité auxquelles les vitrages de tous les véhicules doivent satisfaire. Les constructeurs ont donc étudié des cahiers des charges applicables à leurs fournisseurs de

pare-brise, qui eux-mêmes ont limité sévèrement les défauts admissibles dans les feuilles de verre qui leur servent de matière première.

Un grand nombre de méthodes de contrôle ont donc fait leur apparition qui sont souvent les seules admises par les clients qui les ont étudiées. Outre leur diversité, ces méthodes sont souvent d'un usage délicat, et leur application demande beaucoup de temps.

Il est donc impérieux pour les verriers de pouvoir disposer d'un nombre minimum d'appareils, capables de mesurer toutes les grandeurs physiques qui font l'objet de stipulations particulières.

L'étude des différents cahiers des charges montre que du point de vue de la qualité de surface des feuilles de verre simple, comme de celle des pare-brise finis, on impose toujours une limite à la déviation que subit un rayon lumineux traversant un vitrage, lorsqu'il l'atteint sous un angle d'incidence bien déterminé.

On exige d'autre part aussi que la déformation générale des images perçues au travers du vitrage n'atteigne pas un niveau prohibitif. Dans ce cas cependant, la notion de distorsion qui englobe tous les aspects de la déformation n'est pas toujours interprétée de la même manière. Dans la plupart des normes, la mesure de la distorsion générale implique une limitation de la puissance optique des défauts, c'est-à-dire une limitation de la courbure locale des dioptries. Cependant, quelques réglementations particulières conçoivent la limitation de la distorsion comme une limitation imposée à l'amplitude des déformations que subit l'image d'une ligne droite vue au travers du vitrage en question. Dans ce cas, on limite tout au plus une courbure générale du vitrage, et la mesure peut encore être effectuée par les méthodes de mesure de la déviation maximum.

Le but du travail qui a été accompli étant d'abord de trouver des points communs à toutes les normes, il n'y a pas lieu de se préoccuper ici du bien-fondé de certaines exigences, mais d'essayer d'y répondre le mieux possible.

On a donc étudié un appareil qui permet de classer un lot de vitrages simples ou composés, sur base de la mesure de la déviation optique que subit un rayon lumineux en le traversant. L'appareil décrit permet d'effectuer le travail rapidement, avec une précision industriellement acceptable.

On peut espérer qu'à l'avenir, l'adjonction de circuits électroniques élaborés permettra de l'utiliser pour la

mesure d'autres grandeurs optiques prévues dans les normes.

## 1. Principes

### 1.1. Effets de la réfraction

L'étude de la propagation d'un rayon lumineux au travers d'un milieu transparent limité par des dioptries  $S_1$  et  $S_2$  (figure 1), met en évidence plusieurs effets de la réfraction:

a) Translation du rayon incident, dû au fait que le cas de l'incidence normale excepté, le point de sortie B de la lumière ne se trouve pas dans le prolongement du rayon incident.

b) Déviation angulaire de la lumière à l'intérieur du milieu limité par les dioptries  $S_1$  et  $S_2$ , sous l'effet d'une variation de l'indice de réfraction dans les directions normales à la direction de propagation.

c) Déviation angulaire due à l'effet conjugué de l'angle d'incidence  $\varphi$  et de l'angle du dièdre formé par les plans tangents aux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  limitant le milieu, aux points d'entrée A et de sortie B du rayon lumineux dans le verre étudié.

Comme le premier effet ne présente aucun danger pour le pilotage des véhicules, il n'est pas pris en considération dans les normes. Les dispositifs de mesure doivent donc être conçus de manière à être insensibles à cette translation. Il est à noter que certaines méthodes de mesure de la déviation optique englobent précisément cette translation, ce qui implique que les résultats des mesures doivent être corrigés par calcul.

L'influence du gradient d'indice n'est pas spécifiée dans les normes, et est en fait assimilée dans la mesure de la déviation angulaire, à l'effet de prisme provoqué par le manque de parallélisme des plans tangents à  $S_1$  et  $S_2$ . Il est à noter que si l'influence du gradient d'indice est strictement nulle sous incidence normale, parce que  $\overline{\text{grad}} n$  est un vecteur perpendiculaire aux faces, aux incidences élevées il peut avoir un effet perceptible que l'on peut chiffrer à partir de l'expression:

$$\delta_x = \int_A^B \frac{1}{n^2} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} \frac{dn}{dy} dy. \quad (1)$$

Cette expression de la déviation angulaire interne de la lumière s'obtient en introduisant dans l'expression de la déviation angulaire due à l'hétérogénéité du milieu, calculée par GONTIER [1], la composante de  $\overline{\text{grad}} n$  perpendiculaire à la direction de propagation du rayon lumineux. Cet effet de déviation interne de la lumière peut contribuer à expliquer les divergences communément obtenues entre la déviation optique mesurée à haute incidence et la déviation théorique calculée par la relation de KERKHOFF [2], à partir de la mesure de la déviation optique sous incidence normale.

L'influence de l'angle  $\alpha$  compris entre les plans tangents aux dioptries  $S_1$  et  $S_2$  aux points d'entrée A et de sortie B de la lumière est bien connu. Cependant, si on peut admettre que le rayon incident et le rayon émergent forment un plan qui contiennent les normales aux points A et B aux surfaces  $S_1$  et  $S_2$ , lorsqu'on traite le cas d'une feuille de verre simple, n'ayant subi aucun bombage, cette hypothèse perd progressivement de sa valeur au fur et à mesure que l'on s'écarte de ce cas simple.

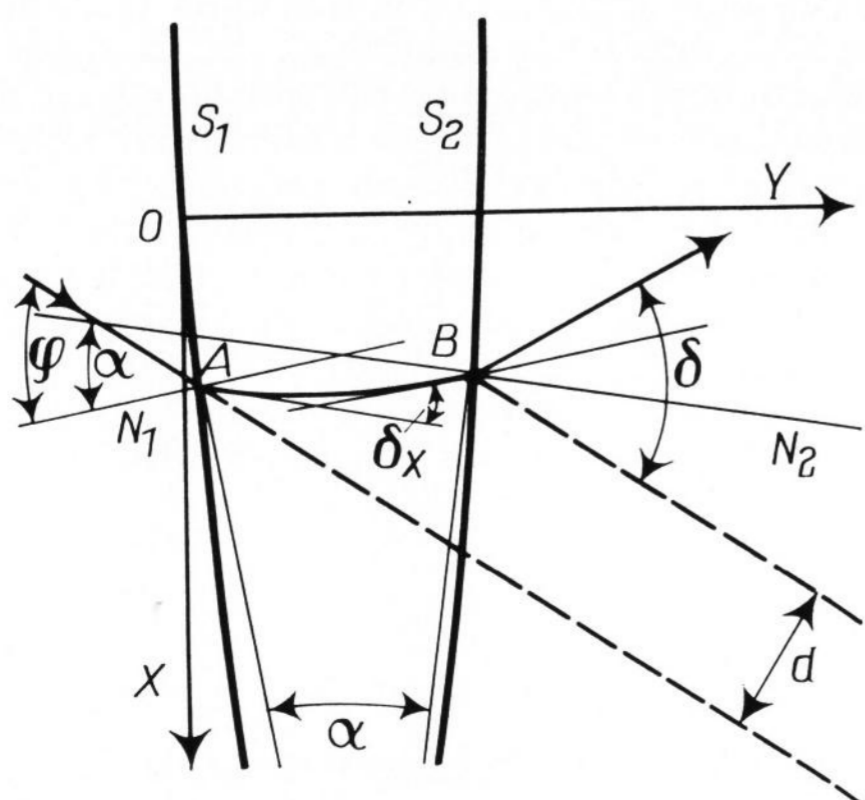


Figure 1. Déviation d'un rayon lumineux par une feuille transparente hétérogène limitée par des surfaces continues.

MIGEOTTE [3] a étudié l'effet de la courbure d'un vitrage cylindrique sur la déviation d'un rayon lumineux incident compris dans le plan contenant la directrice du cylindre, qui montre l'apparition d'effets d'angles entre faces dans des vitrages où l'épaisseur est constante. Si la direction d'incidence est quelconque sur un vitrage bombé, le rayon transmis n'est plus dans le plan d'incidence et la déviation optique qui serait mesurée dans le plan d'incidence est alors inférieure à la réalité. On conclut de cette considération que le montage idéal de mesure de la déviation optique devrait être insensible à la direction dans laquelle se produit la déviation.

1.2. Mesure de la déviation optique

Deux types de dispositifs permettent de mesurer la déviation optique.

Le premier type de dispositifs est basé sur les propriétés des lentilles et miroirs convergents recevant des faisceaux de lumière parallèle. La figure 2a illustre le raisonnement pour une lentille.

Lorsqu'un faisceau lumineux parallèle arrive sur une lentille L ou sur un miroir convergent, en suivant une direction parallèle à celle de l'axe de la pièce d'optique x - x', il y a focalisation du faisceau au foyer F.

On voit par conséquent que si on considère un rayon particulier du faisceau incident, une translation du rayon n'influence pas le fait que ce rayon doit nécessairement passer par le foyer après avoir rencontré la lentille. Si le faisceau incident, quoique parallèle, arrive sur la lentille en suivant une direction y - y' faisant avec l'axe optique un angle δ, il y a focalisation en un point F', situé dans le même plan π - normal à l'axe optique - que le point F. La distance F - F' est donnée par ρ = fδ, où f est la distance focale de la lentille.

Dès lors, un capteur placé dans le plan focal ne sera sensible qu'à la déviation δ, sans l'être à la translation des rayons lumineux ayant traversé un vitrage.

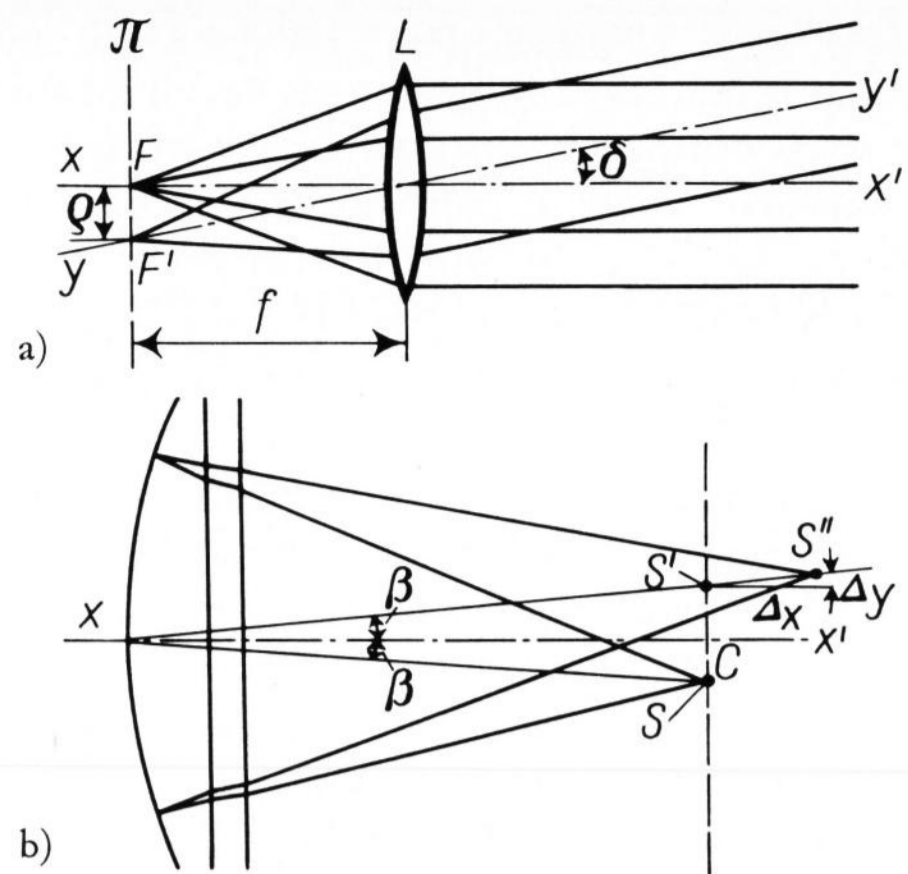
Cette propriété est mise à profit dans les appareils développés par SCHARDIN et STAMM [4] d'une part, par MIGEOTTE et GILARD [5] d'autre part.

Le second type de dispositif est basé sur les propriétés du miroir sphérique utilisé avec de la lumière divergente: une source lumineuse placée au centre de courbure du miroir reçoit sa propre image. Lorsque la source S est située dans un plan π contenant le centre de courbure C du miroir et perpendiculaire à son axe, l'image S' se trouve également dans π, et est la symétrique de S par rapport à C (figure 2b).

L'interposition d'un vitrage à faces planes et parallèles, d'épaisseur e déplace axialement l'image de la source en S'' d'une valeur Δx approximativement égale à e/n et comme l'angle β est conservé, il y a déplacement latéral de l'image d'une valeur approximativement égale à:

$$\Delta y_1 = \frac{e \sin \beta}{n} \quad (2)$$

On verra plus loin que dès qu'un manque de parallélisme des faces du vitrage provoque une déviation δ de la lumière, l'image se déplace latéralement d'une valeur Δy<sub>2</sub> = 2 δR où R est le rayon de courbure du miroir.



Figures 2a et b. Mesure de la déviation optique; a) en lumière parallèle; b) en lumière divergente.

Un capteur placé en S'' mesure par conséquent un déplacement total:

$$\varrho = \Delta y_1 + \Delta y_2 = R \left( 2 \delta + \frac{e \sin \beta}{R n} \right) \quad (3)$$

Si  $\frac{e}{R}$  est de l'ordre de 0,001 et β inférieur à 2°, les valeurs de ρ mesurées pour δ = 1' sont déjà exactes à moins de 0,5% près, ce qui permet d'écrire que dans ces conditions, un tel système est pratiquement insensible à la translation des rayons lumineux.

Il faut remarquer que ce montage présente une sensibilité double de ceux dans lesquels la lumière ne traverse qu'une seule fois le verre. Comme sous incidence normale, la déviation optique n'est attribuable qu'au seul effet de prisme, et vaut pratiquement la moitié de l'angle du dièdre, ce dispositif mesure en fait l'angle entre faces lorsque le vitrage est présenté normalement à l'axe du miroir.

2. Description de l'appareillage

L'appareil construit dérive de ceux réalisés par SCHARDIN [4] et par TOEPLER [6]. Dans chacun de ces appareils, la lumière ne traverse qu'une seule fois le vitrage examiné (figure 3).

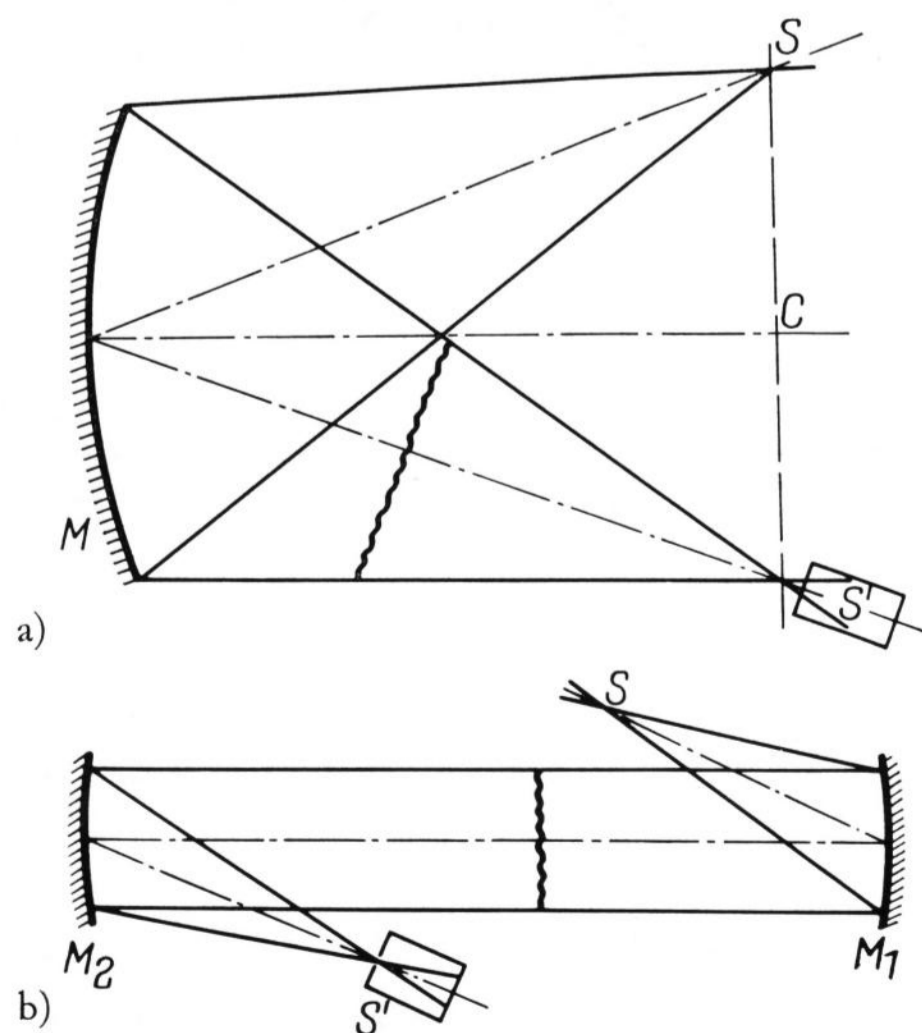


Figure 3. Procédés de mesure de la déviation optique, avec miroirs convergents; a) d'après TOEPLER [6]; b) d'après SCHARDIN [4].

Le dispositif imaginé par TOEPLER ne comporte qu'un seul miroir et fonctionne donc en lumière non-parallèle mais comme le vitrage n'est introduit que dans le seul faisceau réfléchi, les faisceaux lumineux sont très inclinés sur l'axe du miroir pour pouvoir examiner la portion la plus grande possible du vitrage. Il en résulte des aberrations qui engendrent des erreurs de mesure.

Le dispositif de SCHARDIN comporte deux miroirs sphériques également utilisés sous une incidence assez grande. Celle-ci peut cependant être limitée par l'utilisation de miroirs de faible ouverture, dont il résulte l'inconvénient de la réduction de la surface examinée. En outre, l'encombrement de cet appareil est assez important.

Le dispositif que l'auteur a construit présente les avantages des méthodes inventées par TOEPLER et SCHARDIN. On en a cependant évité les inconvénients en utilisant un seul miroir avec un rendement maximum. On obtient donc avec cet appareil une vue simultanée de la déviation optique sur une importante partie du vitrage examiné. Cette mesure peut être faite par du personnel non qualifié, et peut même être complètement automatisée.

La figure 4 représente schématiquement le montage réalisé. On y distingue un ensemble «source» S, un ensemble «récepteur» P, et un miroir sphérique M. Ce dernier a un diamètre de 600 mm et un rayon de courbure de 4000 mm.

Montés sur une même taque, les ensembles «source» et «récepteur» sont solidarisés. Les axes  $x - x'$  de la source et  $\xi - \xi'$  du miroir sont coplanaires et distants d'une valeur  $q$ .  $\pi$  est le plan perpendiculaire à ces deux axes, qui contient le centre de courbure du miroir concave.

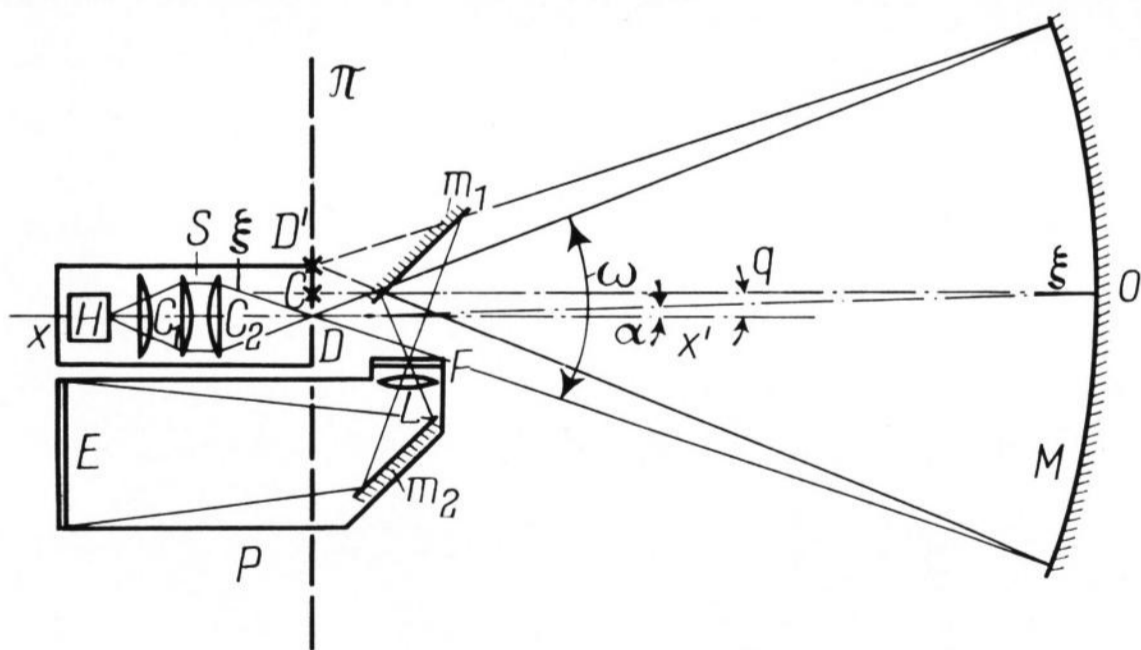


Figure 4. Schéma de l'appareil construit.

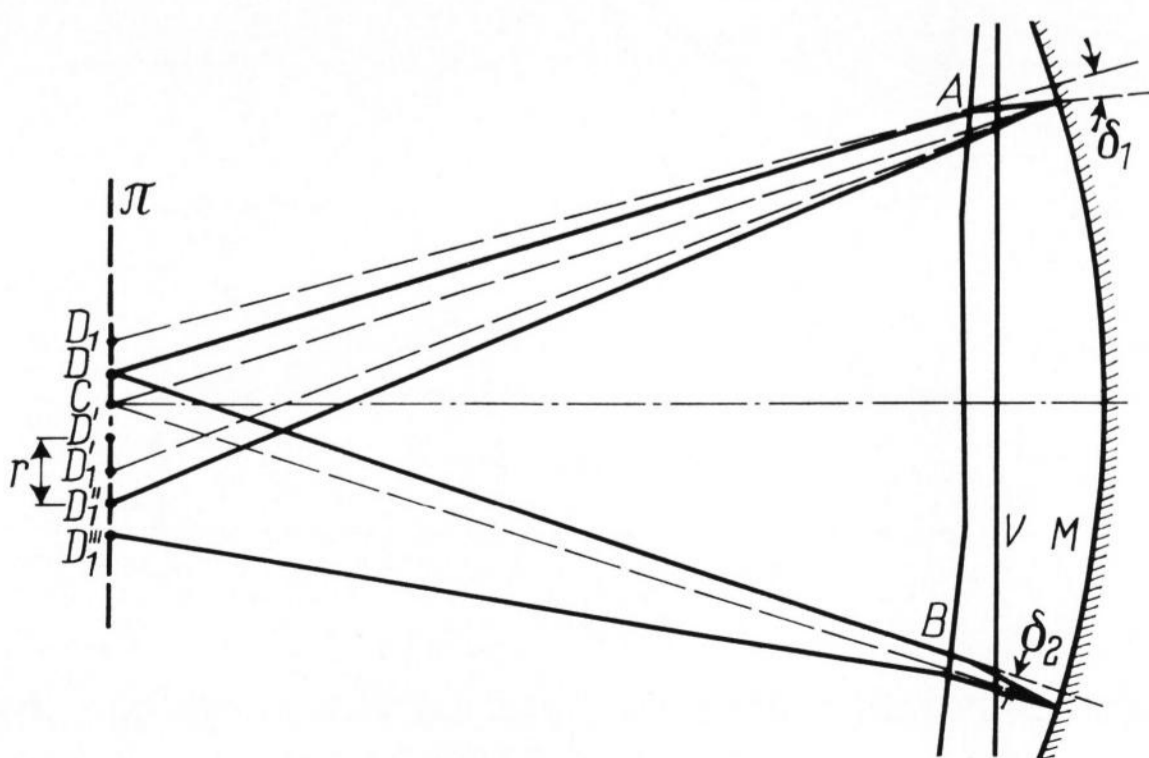


Figure 5. Etude de la marche des rayons lumineux.

L'ensemble «source» comporte une lampe à vapeur de mercure à haute pression H, un condensateur  $C_1$ , l'objectif  $C_2$ , et le diaphragme à trous D. Ce montage fait converger sur le diaphragme le maximum d'énergie qui se propage ensuite en un faisceau divergent, et procure un éclairage sensiblement uniforme du miroir.

Comme le diaphragme D est dans le plan  $\pi$ , à proximité du centre de courbure C, et déporté à l'extérieur de l'ensemble «source» et de l'ensemble «récepteur», l'image  $D'$  de D se forme dans  $\pi$  et est localisée symétriquement de D par rapport à C.

Le miroir plan  $m_1$  situé hors de l'axe de la source, mais orienté à  $45^\circ$  par rapport à l'axe  $x - x'$ , intercepte le faisceau lumineux convergent réfléchi par le miroir sphérique M et le renvoie vers un filtre particulier F sur lequel l'image  $D''$  de la source se forme. On peut modifier légèrement l'orientation du petit miroir  $m_1$  au moyen de vis de réglage afin de faciliter le centrage de l'image de la source.

Divers filtres F peuvent être présentés devant l'image de la source. Ils sont montés sur un disque muni d'un arrêt à cliquet qui permet une permutation et un positionnement rapides et précis d'un filtre déterminé. Suivant que l'on désire effectuer une observation visuelle ou engendrer un signal électrique, le filtre se compose soit de couronnes concentriques de couleurs différentes, soit d'un disque opaque au milieu d'une zone transparente. Selon que l'on souhaite utiliser l'appareil sur une chaîne automatique de repassage ou que l'on désire apprécier visuellement la qualité du verre, le filtre F est suivi d'un détecteur photoélectrique ou d'une lentille.

L'appareil construit permet l'examen suivant les deux versions, un simple levier permettant de disposer l'un ou l'autre organe derrière le filtre.

Sur la figure 4, c'est la lentille L qui est représentée en position d'utilisation. Le faisceau lumineux qui la traverse est réfléchi par un jeu de miroirs plans qui permettent d'obtenir l'image dans la position la plus intéressante pour l'utilisateur. Quoique représenté à l'arrière de l'appareil à la figure 4, l'écran est en réalité situé à l'avant de l'appareil pour permettre à la personne qui présente les feuilles de verre devant le miroir concave, de voir l'image et donc de porter un jugement sur la qualité du verre. L'ensemble a été calculé pour donner une image de 300 mm de diamètre. Le rapport de réduction est donc de 0,5.

Pour décrire le fonctionnement de l'appareil, on imagine le cas d'une feuille de verre dont une des faces est plane, l'autre formant avec la première des dièdres d'angles différents.

Soit  $\delta_1$  la déviation angulaire (figure 5) que subit le rayon émanant du point D et arrivant en A sur le verre. A cause de cette déviation, le rayon semble émaner de  $D_1$  et donc, après réflexion sur le miroir sphérique, le rayon lumineux se dirige vers  $D'_1$ , symétrique de  $D_1$  par rapport à C, situé dans le plan  $\pi$ , perpendiculaire à l'axe du miroir et contenant le centre de courbure C et les points D et  $D_1$ .

En traversant une seconde fois la feuille de verre, le rayon subit une seconde déviation  $\delta_2$  égale à la première, et rencontre le plan  $\pi$  au point  $D''_1$ . Soit  $r_1$  la distance  $D'_1$ , image de D en l'absence du verre, au point  $D''_1$  image de D lorsque le verre est interposé. On a  $r_1 = (D'D'_1) + (D'D''_1) = 2 R\delta_1$ .

Comme le rayon émanant de D et arrivant en B subit une déviation angulaire  $\delta_2$ , différente de  $\delta_1$  parce que l'angle des faces en B est différent de celui en A, l'image  $D''_1$  de D, donnée par l'élément de surface de verre voisin du point B se situera à une autre distance  $r_2$  de D', donnée par  $r_2 = 2 R\delta_2$ .

On voit qu'autour de D', il y aura autant de points-images de D qu'il y aura de zones présentant une déviation angulaire différente et que les lieux des points  $D''_1$  correspondant à des déviations  $\delta$  égales mais dirigées dans toutes les directions autour de D', sont des cercles. Le filtre sera donc constitué de cercles concentriques dont le rayon extérieur  $r_i$  sera lié au rayon  $r_0$  du diaphragme de la source, au rayon du miroir R, et à la limite de déviation admise  $\delta_i$ , par la relation:

$$r_i = 2 R\delta_i + r_0. \quad (4)$$

Dans le prototype faisant l'objet de cette description, l'image reste incolore pour  $\delta < 1'$ . Pour  $\delta$  croissant par paliers de  $0,5'$  de  $1$  à  $3'$ , on a successivement les couleurs suivantes: jaune, bleu, vert, rouge.

Lorsque la cellule photoélectrique est utilisée, le filtre est en réalité un écran qui empêche la lumière de parvenir à la cellule aussi longtemps que la déviation reste inférieure à la limite que l'on s'est fixée.

Le contact établi par la cellule peut être utilisé pour actionner un aiguillage qui dirige le vitrage soit sur une ligne d'acceptation, soit sur une ligne de refus. Dans le cas des pare-brise bombés, il faut cependant que le circuit de mesure soit déconnecté du circuit de commande pendant la mise en place du vitrage, afin d'éviter que le passage des parties les plus courbées situées en-dehors de la zone de vision ne soient la cause d'un rebut systématique de toutes les pièces présentées.

### 3. Précision de mesure et limites de construction

L'usage de la lumière divergente pour l'examen des vitrages entraîne une certaine imprécision systématique des mesures. Ceci n'exclut pas pour autant le procédé. Il convient en effet d'examiner si les erreurs engendrées sont compatibles avec la fonction que l'appareil remplit, en tenant compte des performances des autres procédés utilisés dans le même but.

Les méthodes de mesure de la déviation optique préconisées dans les normes peuvent être classées en deux groupes:

- a) Méthodes de mesure de déformation de réseaux de lignes projetées à travers les vitrages au moyen d'un projecteur de diapositives.
- b) Méthodes d'observation directe de doubles images de mires, soit au travers des vitrages, soit par réflexion sur les deux faces.

Les procédés par projection font également appel à des faisceaux lumineux non parallèles. Cependant leur principale imprécision réside dans le fait que les objectifs de projection utilisés ne permettent généralement pas d'obtenir des images suffisamment nettes. Cette seule cause introduit des erreurs relatives de l'ordre de 10%. En outre, l'effet optique perçu est en fait un effet moyen résultant de la réfraction de la lumière sur une portion de surface pouvant atteindre 5 mm de diamètre.

Les méthodes de mesure par observation visuelle sont basées sur l'appréciation de la tangence de deux

images. Il y a là encore une source d'imprécision d'autant plus grave que ces tests ne présentent habituellement que les seules possibilités d'accepter ou de refuser le vitrage examiné.

Enfin, dans les deux types de tests l'examen n'est pas global. Il faut donc procéder à une inspection séquentielle de toutes les plages juxtaposées, ce qui exige toujours beaucoup de temps.

La validité de la méthode qui fait l'objet de cette communication dépend de l'importance de plusieurs paramètres:

- a) Influence de la variation de l'angle d'incidence d'un point à l'autre du verre sur la précision de la mesure.
- b) Influence d'une position inclinée du verre examiné.
- c) Influence de la distance du verre au miroir sur la précision de mesure.

L'influence de chacun de ces paramètres sera étudiée successivement. On n'a cependant pas étudié l'effet de la diffraction de la lumière. Celle-ci n'intervient en effet que pour limiter le seuil de sensibilité de cet appareil, qui de toute manière se trouve déjà limité par la turbulence de l'air entre le miroir, la source et le récepteur. Cette cause est inévitable lorsque l'appareil est destiné à être inséré dans une chaîne de contrôle.

#### 3.1. Influence de la variation de l'angle d'incidence

Si on considère un plan diamétral du miroir concave, l'incidence de la lumière en chacun des points d'intersection de ce plan avec la surface du miroir varie.

Etant donné que la déviation que subit la lumière en traversant un prisme dépend de l'angle d'incidence de la lumière sur la première face, la déviation que subit un rayon en traversant un défaut donné varie selon la position de ce défaut devant le miroir.

Il faut donc limiter la divergence utile du faisceau lumineux, c'est-à-dire l'angle d'ouverture du miroir, pour que l'erreur de mesure qui résulte du non-parallélisme des rayons incidents soit industriellement acceptable.

Appelant  $E_r \delta$  (en %) la variation relative de déviation optique, à laquelle un défaut quelconque peut donner lieu lorsqu'on le déplace depuis le sommet du miroir vers sa périphérie, on a:

$$E_r \delta = 100 (\delta_{\max} - \delta_{\text{moy}}) / \delta_{\text{moy}}. \quad (5)$$

Supposons tout d'abord qu'il s'agisse d'une feuille plane que l'on place le plus près possible du miroir, c'est-à-dire, appuyée au bord du miroir. On a que  $\varphi_{\text{moy}} = 0$  car cette direction est celle de l'axe optique du miroir.

La figure 6 représente l'évolution de l'erreur relative sur la mesure de la déviation  $E_r \delta$  en fonction de l'angle

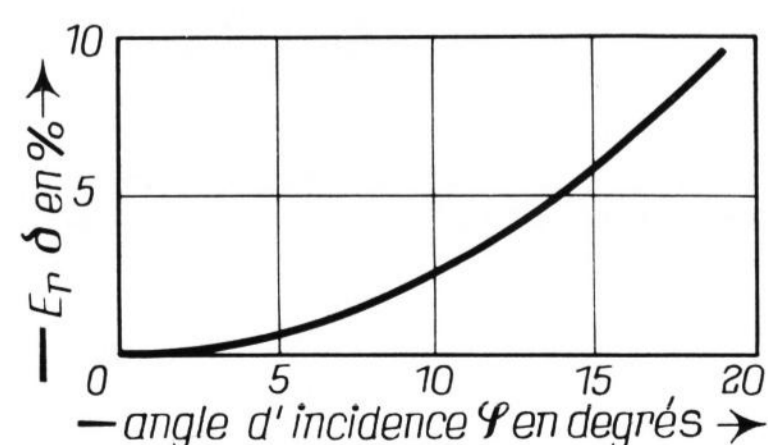


Figure 6. Evolution de l'erreur relative de la mesure de la déviation en fonction de l'écart d'angle d'incidence pour un angle d'incidence moyen nul.

d'incidence  $\varphi$ . Elle montre, que dans ce cas on peut admettre une demi-ouverture de miroir de l'ordre de  $20^\circ$  avant d'atteindre 10% d'erreur, ce qui est estimé tout à fait courant avec les méthodes de mesure préconisées par différents types de normes.

### 3.2. Influence de la position inclinée du verre examiné

Lorsqu'on incline le vitrage devant le miroir, comme lors de l'examen d'un pare-brise en position d'utilisation, la différence relative de déviation varie rapidement suivant que le rayon lumineux considéré est celui qui atteint la base ou le sommet du pare-brise. L'angle d'incidence varie d'une certaine valeur autour de la valeur de l'angle d'incidence moyen, qui est l'angle complémentaire de l'angle d'inclinaison du pare-brise.

La déviation optique varie d'autant plus, pour un écart d'angle d'incidence donné, que l'angle d'incidence moyen est plus élevé.

La figure 7 représente la variation relative de la déviation optique en fonction de l'écart d'angle d'incidence entre un rayon qui tombe en un point quelconque du vitrage examiné et un rayon qui le traverse au droit du sommet du miroir, pour des vitrages inclinés.

On constate que d'importantes différences peuvent être perçues, et ceci pourrait incliner à croire que ce procédé n'est réservé qu'à l'examen des verres plats placés perpendiculairement à l'axe du miroir.

Cependant beaucoup de constructeurs de voitures, et plusieurs normes officielles exigent que le pare-brise soit examiné dans sa position d'utilisation. On examine alors sur un écran l'image d'une mire qui y est formée par projection d'une diapositive à travers le pare-brise. Dans ce cas, une même variation relative de la déviation optique se produit entre les bords inférieur et supérieur du pare-brise. Celle-ci est habituellement négligée lorsque la distance entre le projecteur et le verre examiné est de l'ordre de 4 m, la variation d'incidence étant alors de trois à quatre degrés par rapport à l'incidence moyenne, et les parties les plus affectées d'erreur étant les moins intéressantes dans les pare-brise examinés.

On est donc fondé de croire que cette variation de la déviation optique que l'on enregistre avec ce procédé

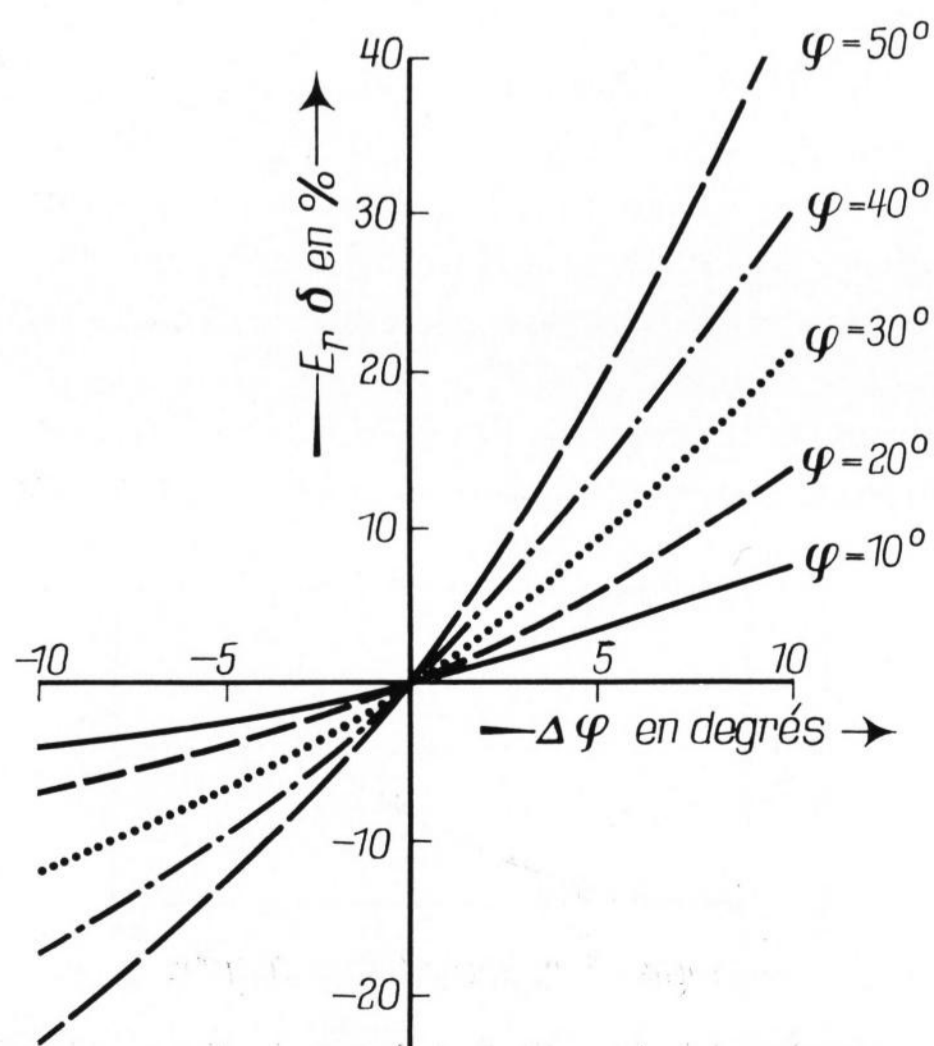


Figure 7. Variation relative de la déviation optique en fonction de l'écart d'angle d'incidence sur des vitrages inclinés.

est en fait systématique à tous les procédés d'examen des vitrages «en position d'utilisation», et peut être négligé dans ce cas-ci au même titre qu'elle est négligée dans les autres.

### 3.3. Influence de la distance du verre au miroir sur la précision de la mesure

Soit  $d$  la distance séparant le point d'entrée d'un rayon lumineux dans le verre, du point du miroir où ce rayon se réfléchit.

La distance  $r$  qui sépare l'image de la source de sa position idéale est donnée par

$$r = \delta \cdot (d + R) + \delta (R - d) = 2 R \delta. \quad (6)$$

Pour un vitrage dépourvu de puissance optique, l'éloignement du vitrage du miroir n'a donc pas d'influence sur la mesure de l'angle entre faces.

Cependant, un autre effet peut être dû à la distance séparant le verre du miroir.

Il a été signalé dans la description du montage optique que l'axe de la source était séparé de l'axe du miroir d'une distance  $q$ .

Dès lors, puisque les rayons lumineux ne suivent pas le même chemin à l'aller qu'au retour, les points d'entrée et de sortie de la lumière dans le verre ne coïncident pas. Cette distance entre les points d'entrée et de sortie est donnée par  $p = 2 qd/R$ .

Il résulte de cette relation que pour éviter des effets différentiels dans les mesures, il faut rendre  $q$  et  $d$  minima tandis que  $R$  doit être choisi le plus grand possible.

En choisissant un miroir dont le rayon de courbure est de 4000 mm pour un diamètre de 600 mm, il suffit de donner à  $q$  une valeur de 10 mm pour que l'ensemble fonctionne dans de bonnes conditions de précision.

On a alors que la valeur de  $\beta$  est de  $1^\circ 30'$ , les différences d'angle d'incidence entre le sommet du miroir et un point périphérique étant de  $4^\circ 20'$ .

Dans ces conditions, l'erreur systématique de mesure qui en résulte est inférieure à 1%.

Il faut également remarquer que pour un pare-brise examiné sous incidence d'utilisation ( $\varphi = 40^\circ$ , c'est-à-dire une inclinaison de  $50^\circ$ )  $\Delta\varphi$  étant inférieur à  $\pm 4^\circ$ , la variation relative de déviation optique est de l'ordre de  $\pm 10\%$ .

Enfin, pour un pare-brise de 600 mm de hauteur, dont la génératrice centrale fait un angle de  $50^\circ$  avec l'horizontale, et dont la base est écartée de 50 mm de la périphérie du miroir, la distance maximum entre les points d'entrée et de sortie d'un rayon lumineux dans le verre est de 2,375 mm.

Cette distance est du même ordre de grandeur que le diamètre de la zone d'un vitrage intéressé par la mesure de l'angle entre faces, dans les autres méthodes, et peut donc être tolérée au même titre.

## 4. Résultats expérimentaux

On a examiné une série de verres plats au moyen de l'appareil construit, et au moyen de l'appareil de mesure de l'angle de déviation mis au point par l'Institut National du Verre de Belgique.

La figure 8 représente les histogrammes comparatifs des deux méthodes. L'histogramme de gauche est celui de la répartition des verres obtenue avec l'appareil décrit, l'angloscope.

Dans l'histogramme de droite, l'auteur a regroupé par classes les angles entre faces maxima mesurés au dioptron mis au point à l'I.N.V. et confirmés au moyen d'une lunette autocollimatrice.

On constate que les distributions sont assez semblables, et les différences observées ne sont pas très significatives, quoique l'on devrait s'attendre à ce que le dioptron par son examen suivant une seule ligne transversale, ait tendance à sous-estimer la valeur véritable de l'angle entre faces. Mais cet effet devrait être surtout visible avec des verres collés examinés en incidence oblique. En effet, dans ces conditions l'hypothèse d'une faible variation de la déviation optique dans le sens d'étirage est admissible. Les divergences entre les deux méthodes peuvent donc être imputées à l'imprécision tolérée sur l'angloscope.

### 5. Conclusions

L'utilisation de la lumière divergente pour examiner les vitrages du point de vue de la déviation optique est largement suffisante pour des mesures industrielles, pour autant qu'on se limite à des divergences inférieures à  $5^\circ$ .

### 6. Bibliographie

- [1] GONTIER, G.: Contribution à l'étude de l'interféromètre différentiel à biprisme de Wollaston. Publ. sci. techn. Ministère de l'Air **338** (1957) p. 58 - 61.
- [2] KERKHOF, F.: Optische Wirkungen von Flachglas mit unebenen Oberflächen. Glastechn. Ber. **25** (1952) p. 71 à 83.
- [3] MIGEOTTE, P.: Kritische Untersuchung einiger Verfahren zur Messung der optischen Eigenschaften von Verglasungen. (Orig. ital.) Vetro e Silicati — Tecn. Vetr. **10** (1966) N° 2, p. 11 - 14.
- [4] SCHARDIN, H. et STAMM, G.: Prüfung von Flachglas mit Hilfe eines farbigen Schlierenverfahrens. Glastechn. Ber. **20** (1942) p. 249 - 258.
- [5] MIGEOTTE, P. et GILARD, P.: Méthode de mesure automatique de l'angle des faces et de l'épaisseur d'un vitrage. VIIe Congrès International du Verre, Bruxelles 1965. Communication 350.
- [6] TOEPLER, A.: Beobachtungen nach der Schlierenmethode. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Leipzig 1906. p. 158.

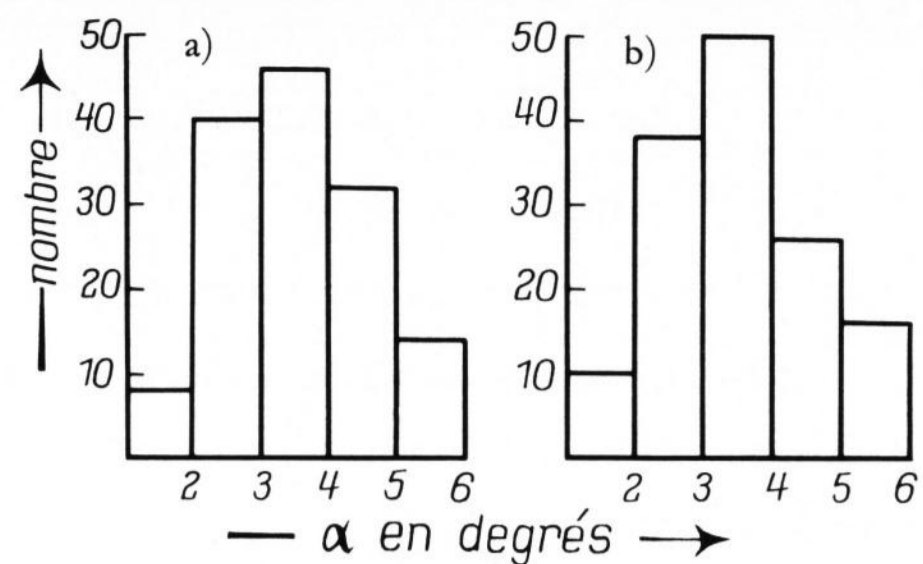


Figure 8. Comparaison des mesures de déviation optique au moyen du dioptron et de l'appareil décrit;

a) angloscope; b) angle entre faces maximal.

On peut réaliser de la sorte un angloscope qui permet d'examiner un pare-brise sur toute sa hauteur, et ceci avec un seul miroir concave, ce qui diminue le coût de l'installation.

Le coût de l'installation peut être rapidement amorti compte tenu de la cadence de contrôle qu'il permet de tenir.

Le dispositif peut être aisément automatisé, mais ne requiert de toute manière aucune qualification de la part de la personne qui s'en sert.