

**APPLICATION DE LA TECHNIQUE DES MOIRÉS  
À L'ÉTUDE DE LA SURFACE D'UN  
REVETEMENT ROUTIER**

**RELEVÉ DYNAMIQUE DE LA TOPOGRAPHIE  
D'UNE CHAUSSÉE**

S. Oesch, N. Sabri, L. Pflug

IMAC - Mesure et Analyse des Contraintes  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
1015 Lausanne

Décembre 1987

# APPLICATION DE LA TECHNIQUE DES MOIRÉS A L'ÉTUDE DE LA SURFACE D'UN REVETEMENT ROUTIER

## Résumé

L'orniérage constitue un phénomène inévitable d'altération des chaussées et sa détection précoce revêt de ce fait une importance décisive pour la gestion de la maintenance et de l'entretien des voies de circulation.

Du bon état de la chaussée dépend non seulement le confort des usagers, mais aussi la sécurité du trafic et la pérennité du réseau routier.

Afin de répondre aux besoins exprimés par les responsables des services d'entretien des routes, le Laboratoire d'Analyse des Contraintes de l'EPFL (IMAC) a développé un appareillage en continu de l'orniérage de la chaussée.

Cette observation s'obtient par application de la technique du moiré, qui consiste à superposer un réseau lié à la structure déformée et un réseau témoin.

Les franges d'interférences résultant de cette superposition donnent les courbes de niveau de la surface examinée par rapport à un plan de référence convenablement choisi.

Le rapport décrit les phases de développement du prototype ainsi que la technique de mesure et présente les lois de formation des franges.

Le logiciel d'interprétation en termes géométriques, permettant l'établissement des profils en travers, est également présenté.

# ANWENDUNG DES PROJEKTIONSMOIRE-PRINZIPS BEI FORTLAUFENDER UNTERSUCHUNG DER FAHRBAHN

## Zusammenfassung

Die Verwaltung und der Unterhalt der Strassen bilden eine wesentliche Grundlage zur Aufrechterhaltung der Infrastruktur eines Landes.

Um diesem Bedürfnis zu genügen, hat das Labor für Spannungs- und Dehnungsanalyse der ETHL (IMAC) eine Vorrichtung vorgeschlagen und ausgeführt, die eine fortlaufende Erhebung der Spurrinnen erlaubt. Die erhaltenen Werte eignen sich zur informatischen Bearbeitung, was insbesondere die Einführung bedeutender Parameter wie Muldentiefe und theoretische Wassertiefe in eine Datenbank der Strasse erlaubt.

Die Spurrinnen sind aus der lokalen Topographie einer Strasse ersichtlich. Dank der kontinuierlichen Aufnahme dieser Topographie kann der Praktiker so viele Querprofile erhalten, wie er als sinnvoll betrachtet. Diese Querprofile beinhalten ausserdem explizite Parameter wie die Lage des Profils, die Querneigung sowie die Wasser- und Muldentiefe.

Der Bericht beschreibt die verschiedenen Entwicklungsphasen der Messmethode, die dazu gehörige Apparatur sowie das Auswertungsprogramm.

# TABLE DES MATIERES

## NOTATIONS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | INTRODUCTION  | 1  |
|    | 1.1. Motivation   | 1  |
|    | 1.2. Objectif   | 2  |
| 2. | CHOIX DE LA METHODE DE MESURE   | 4  |
|    | 2.1. Choix d'une méthode optique  | 4  |
|    | 2.2. Choix du moiré de projection   | 5  |
| 3. | METHODE DU MOIRE DE PROJECTION  | 6  |
|    | 3.1. Principe du moiré de projection  | 6  |
|    | 3.2. Interprétation des franges de moiré observées                                | 8  |
|    | 3.3. Calcul des coordonnées d'un point de la route                                | 14 |
|    | 3.4. Particularité de la technique appliquée à l'analyse dynamique d'une chaussée | 18 |
| 4. | ETUDE EXPERIMENTALE   | 21 |
|    | 4.1. Essais préliminaires   | 21 |
|    | 4.2. Essais en halle  | 24 |
| 5. | CONCEPTION ET REALISATION D'UN PROTOTYPE D'APPAREIL DE MESURE                     | 26 |
|    | 5.1. Dispositif de relevé du profil en travers                                    | 26 |
|    | 5.1.1. Composants de la projection  | 28 |
|    | 5.1.2. Composants de l'observation  | 30 |
|    | 5.1.3. Système d'enregistrement de l'information                                  | 31 |
|    | 5.2. Véhicule de mesure   | 32 |
|    | 5.3. Appareils de saisie de données complémentaires                               | 34 |
|    | 5.3.1. Positionnement longitudinal  | 34 |
|    | 5.3.2. Positionnement latéral   | 35 |
|    | 5.3.3. Dévers de la chaussée  | 35 |
|    | 5.3.4. Indications sur le revêtement  | 38 |
| 6. | ENGAGEMENT <i>IN SITU</i> DU VEHICULE : ACQUISITION DES DONNEES                   | 38 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 7.  | TRAITEMENT DES DONNEES   | 39 |
|     | 7.1. Interprétation qualitative  | 40 |
|     | 7.2. Interprétation quantitative   | 43 |
|     | 7.2.1. Introduction des coordonnées des points<br>d'une frange à l'ordinateur  | 43 |
|     | 7.2.2. Transformation des coordonnées des points<br>d'une frange dans un système de référence fixe                           | 44 |
|     | 7.2.3. Calcul de la profondeur d'ornière et de la profon-<br>deur d'eau. Représentation graphique du profil                  | 46 |
| 8.  | ETUDE EXPERIMENTALE <i>IN SITU</i>   | 46 |
| 9.  | CONCLUSIONS  | 47 |
| 10. | BIBLIOGRAPHIE  | 48 |
|     | ANNEXE 1 - Calcul de l'altitude $Z_M'$ du point M de l'objet   | 49 |
|     | ANNEXE 2 - Intersections avec un plan incliné à $10^\circ$   | 51 |
|     | ANNEXE 3 - Procédure de choix des valeurs attribuées<br>aux paramètres intervenant dans la mesure<br>par moiré de projection | 52 |
|     | ANNEXE 4 - Projecteur constitué par quatre lampes<br>placées radialement   | 53 |
|     | ANNEXE 5 - Dispositif de mesure  | 54 |

## NOTATIONS

|               |   |
|---------------|---|
| T             | profondeur d'ornière  |
| t             | profondeur d'eau  |
| $\beta$       | angle de projection   |
| $\varepsilon$ | inclinaison de la plaque par rapport à la perpendiculaire à l'axe optique |
| g             | grandissement   |
| $R_o$         | réseau projeté  |
| $R_t$         | réseau témoin   |
| $R_f$         | image du réseau projeté   |
| p             | pas du réseau dans le plan de référence                                   |
| P             | objectif de projection  |
| O             | objectif d'observation  |
| XY            | plan de référence   |
| XYZ           | système de référence lié au dispositif                                    |
| $X_1Y_1Z_1$   | système de référence lié à la route                                       |
| $\delta_o$    | distance entre les objectifs et le plan de référence                      |
| N             | ordre de la frange  |
| b             | distance entre les objectifs P et O                                       |
| h             | distance entre deux plans successifs                                      |
| $\varphi_o$   | angle d'inclinaison du dispositif   |
| $\alpha$      | inclinaison générale des franges  |
| d             | distance entre les franges  |
| i             | dévers de la chaussée   |

# APPLICATION DE LA TECHNIQUE DES MOIRÉS À L'ÉTUDE DE LA SURFACE D'UN REVETEMENT ROUTIER

## RELEVÉ DYNAMIQUE DE LA TOPOGRAPHIE D'UNE CHAUSSÉE

### 1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les éléments essentiels de la recherche commencée en 1978 à l'IMAC, intitulée "Application de la technique des moirés à l'étude de la surface d'un revêtement routier" [1]. Il décrit le dispositif élaboré pour l'observation en temps réel du profil en travers et fait part des expériences acquises lors de la mise en service *in situ* de l'appareil de mesure.

#### 1.1. Motivation

En 1973, le groupe C6 de l'OCDE publie un rapport intitulé "Entretien des routes en rase campagne" [2]. Ce rapport met en évidence la nécessité d'élaborer une instrumentation adéquate, à grand rendement, afin de garantir une auscultation pertinente de la chaussée.

Compte tenu de la nécessité vitale pour l'économie et l'activité d'un pays du maintien d'un réseau routier de bonne qualité, il importe d'en assurer la gestion de manière efficace et économe. L'observation systématique, continue dans l'espace et réalisée à intervalles réguliers de l'état et du comportement réel de la chaussée constitue le préalable et la base d'une telle gestion.

C'est dans cet esprit qu'a été conçu, réalisé et engagé un dispositif de relevé en continu de l'orniérage préparé par l'IMAC à l'intention des responsables de l'entretien des chaussées. Le système proposé est désigné par le sigle *ECTOR* (Examen Continu de la Topographie Routière).

## 1.2. Objectif

Dans la norme VSS 640520a [3], on peut lire: "la planéité est une propriété de la chaussée déterminante pour le confort du trafic; elle influence la sécurité et la longévité des revêtements. Elle est fonction de l'aspect géométrique de la chaussée; sa texture ne doit cependant pas être prise en considération. On distingue la planéité dans le sens transversal et la planéité dans le sens longitudinal. Pour la sécurité du trafic, c'est essentiellement la planéité dans le sens transversal qui est déterminante".

La norme définit le vrai profil comme étant une coupe longitudinale ou transversale de la surface d'une couche de revêtement alors que le profil théorique est le profil de revêtement prévu par le projet ou fixé ultérieurement. Lors d'un contrôle, deux valeurs caractéristiques servent à apprécier la planéité dans le sens transversal (fig.1) :

- la valeur  $T$  qui représente la profondeur des flaches par rapport à la droite reliant les points les plus élevés compris dans une longueur de 4 mètres;
- la valeur  $t$  qui représente la profondeur des flaches par rapport à l'horizontale (hauteur d'eau théorique).

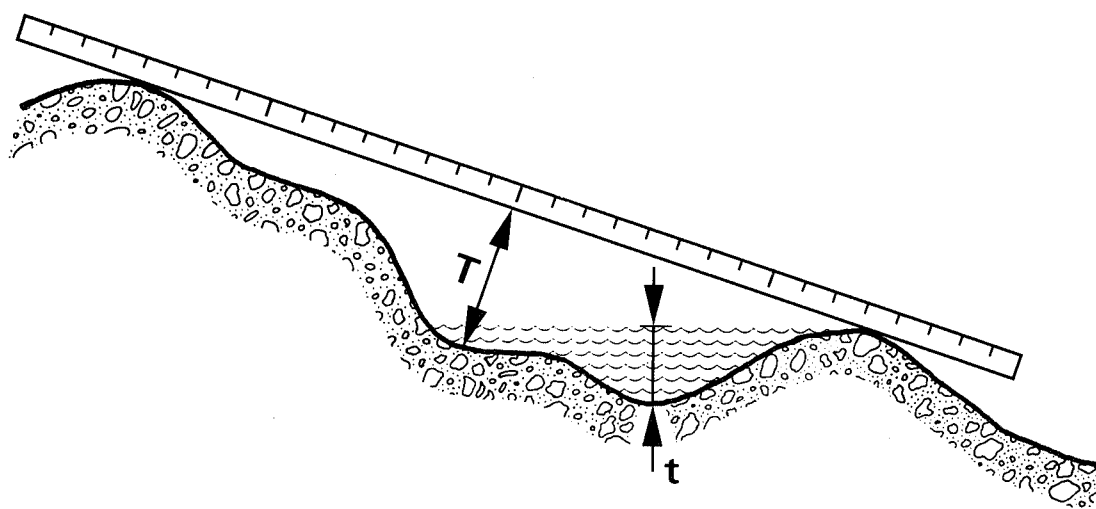


Fig.1. - Définition de la profondeur des flaches  $T$  et de la hauteur d'eau  $t$ .

Le tableau I résume les exigences en matière de planéité fixées dans la norme VSS 640521a [4].

|  | réception<br>T(mm) | limite<br>t(mm) |
|--|--------------------|-----------------|
| Routes à vitesse de base<br>Va < 80 km/h | 6                  | 8               |
| Routes à vitesse de base<br>Va > 80 km/h | 4                  | 4               |

Tableau I - Exigences de planéité selon la norme VSS 640521a.

L'appareil le plus utilisé en Suisse pour contrôler la planéité est le *Planum* qui fournit un relevé graphique du vrai profil. Si cet instrument de mesure se caractérise par une manipulation simple et un faible coût, il impose cependant une interruption momentanée du trafic sur une partie de la chaussée. Ne permettant pas un relevé en continu, l'engagement de cet appareil se fait généralement à intervalles fixes (par exemple tous les 10 mètres) ou suppose une connaissance préalable de l'état de la chaussée par l'utilisateur lors du choix des profils.

L'objectif de cette recherche est de pallier à ces inconvénients majeurs en proposant une méthode de relevé en continu de la topographie fine de la chaussée. A partir de cette information, l'ingénieur peut extraire autant de profils qu'il apparaît nécessaire.

Pour répondre aux besoins exprimés par l'utilisateur, le cahier des charges doit se présenter de la façon suivante:

### Méthode

- Relevé dynamique du profil d'une chaussée (max. 4 mètres) sans interruption du trafic.
- Relevé complémentaire d'informations sur la distance parcourue et le dévers.
- Interprétation qualitative du profil *in situ*.
- Représentation graphique des profils désirés (échelles: 1:1 pour la profondeur, 1:20 pour la largeur de la chaussée).

### Localisation

- Positionnement longitudinal par rapport au kilométrage de l'auto-route.
- Positionnement latéral par rapport à la ligne blanche de la bande d'arrêt d'urgence.

### Précision du relevé

- Profondeur des flaches:  $\pm 1$  mm.
- Dévers: 0.5 %.
- Localisation longitudinale du profil:  $\pm 1$  m.

## 2. CHOIX DE LA METHODE DE MESURE

### 2.1. Choix d'une méthode optique

Pour la mesure de la forme ou de l'évolution dans le temps de la forme d'un objet, certaines méthodes optiques sont particulièrement avantageuses et efficaces: elles peuvent fournir un champ complet d'informations sur la géométrie de l'objet à étudier et ne nécessitent pas de contact matériel avec les surfaces observées.

Le tableau II donne les caractéristiques principales des méthodes engagées à l'IMAC.

| M E T H O D E S  |          |                   |  |                     |                    |                       |                                 | O P T I Q U E S                     |  |  |  |
|------------------|----------|-------------------|--|---------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|--|--|
| Type de lumière  |          | C O H E R E N T E |  |                     |                    | I N C O H E R E N T E |                                 |                                     |  |  |  |
| Méthode          |          | Holographie       | Speckle                                |                     | Moiré d'ombre      | Moiré de projection   | Moiré de reflexion              | Photoelasticité                     |  |  |  |
| Grandeur mesurée |          | w                 | $u, v ; \frac{\partial w}{\partial x}$ |                     | w                  | w                     | $\frac{\partial w}{\partial x}$ | $\sim (\sigma_1 - \sigma_2)$        |  |  |  |
| Dimensions       | stand.   | 1 dm <sup>2</sup> | 5 dm <sup>2</sup>                      |                     | 10 dm <sup>2</sup> | 10 dm <sup>2</sup>    | 10 dm <sup>2</sup>              | $\sim 10$ dm <sup>2</sup>           |  |  |  |
|                  | possible | 1 m <sup>2</sup>  | 1 m <sup>2</sup>                       |                     | 2 m <sup>2</sup>   | 2 - 3 m <sup>2</sup>  | 30 dm <sup>2</sup>              |                                     |  |  |  |
|                  | limite   |                   | ?                                      |                     | ?                  | ?                     | ?                               | ?                                   |  |  |  |
| Sensibilité      | stand.   | $\frac{1}{4} \mu$ | 20 $\mu$                               | $10^{-3} - 10^{-4}$ | 1 mm               | 1 mm                  | $10^{-4}$                       | $\sim 10$ Kg/cm <sup>2</sup> .ordre |  |  |  |
|                  | possible | id.               | -1 $\mu$                               | ?                   | $\frac{1}{10}$ mm  | $\frac{1}{10}$        | $< 10^{-5}$                     |                                     |  |  |  |
|                  | limite   | id.               | -1 $\mu$                               | ?                   | ?                  | ?                     | ?                               |                                     |  |  |  |

Tableau II - Méthodes optiques engagées à l'IMAC.

L'étude de la forme d'un profil d'une chaussée peut être assimilée à la mesure d'un déplacement hors du plan  $w$ . Les méthodes aboutissant à la grandeur désirée sont l'holographie, le moiré d'ombre et le moiré de projection.

## 2.2. Choix du moiré de projection

L'holographie est une technique dont la résolution peut cerner un domaine très vaste de l'ordre du micron à l'ordre du millimètre, mais qui reste pour l'instant confinée à l'enceinte du laboratoire en raison des conditions draconiennes de stabilité requises lors de l'enregistrement des hologrammes.

Le moiré désigne de manière générale tout phénomène d'interférence obtenu par superposition d'un réseau témoin et d'un réseau déformé lié à la structure analysée (fig.2).

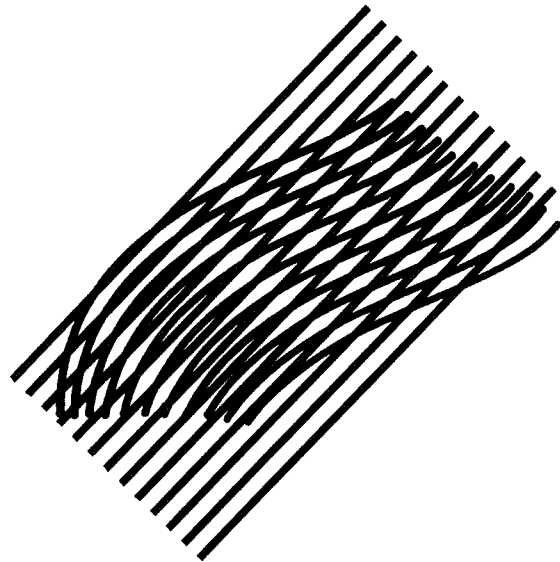


Fig.2. - Interférence de deux réseaux.

Deux types de moiré permettent de représenter, sous certaines conditions décrites plus loin, les lignes d'égale altitude:

- le **moiré d'ombre** : ce phénomène est obtenu par l'interférence entre un réseau témoin et son ombre projetée sur l'objet [5].

La sensibilité obtenue coïncide bien avec les différences de niveau auxquelles on peut s'attendre pour une chaussée. Toutefois, cette méthode

nécessiterait la présence à proximité de l'objet d'un réseau de même taille que lui. Elle ne peut donc que difficilement être appliquée lorsque les surfaces à analyser sont de l'ordre de plusieurs  $m^2$ . D'autre part, en raison du principe même du dispositif, le contraste des franges est assez pauvre.

- le **moiré de projection** : un réseau est projeté sur l'objet à analyser; l'image de ce réseau - dont les lignes épousent exactement la forme de la surface - est superposée à un réseau témoin, créant ainsi les franges d'interférence [6].

C'est assurément la technique la plus appropriée au relevé topographique fin des routes. Elle satisfait au critère de sensibilité (équidistance dans la gamme centimétrique et millimétrique) et autorise l'analyse de surfaces de plusieurs  $m^2$ . Dans la version *moiré multiplicatif*, elle fournit un contraste de franges acceptable avant même toute opération de filtrage.

### 3. METHODE DU MOIRE DE PROJECTION

#### 3.1. Principe du moiré de projection

La figure 3 montre un schéma du système optique proposé pour le relevé dynamique de la topographie de la chaussée.

La mise en oeuvre d'un tel système passe par deux phases bien distinctes:

Dans une phase préliminaire, un réseau  $R_0$  est projeté à travers l'objectif P sur une surface plane placée dans le plan XY. Le réseau image obtenu sur la surface plane est enregistré sur une plaque photographique. Cet enregistrement du réseau image à travers l'objectif d'observation O permet de réaliser le réseau témoin  $R_t$ .

Dans la phase d'exploitation, le réseau  $R_0$  est projeté à travers l'objectif P sur l'objet localisé dans le voisinage du plan XY. Dans ces conditions, le réseau image  $R_i$  se déforme en proportion de la topographie de la surface de l'objet. Observé à travers l'objectif O, il donne naissance à l'image finale  $R_f$ . La superposition de l'image finale et du réseau témoin produit un moiré résultant du battement entre deux familles de lignes d'équations voisines.

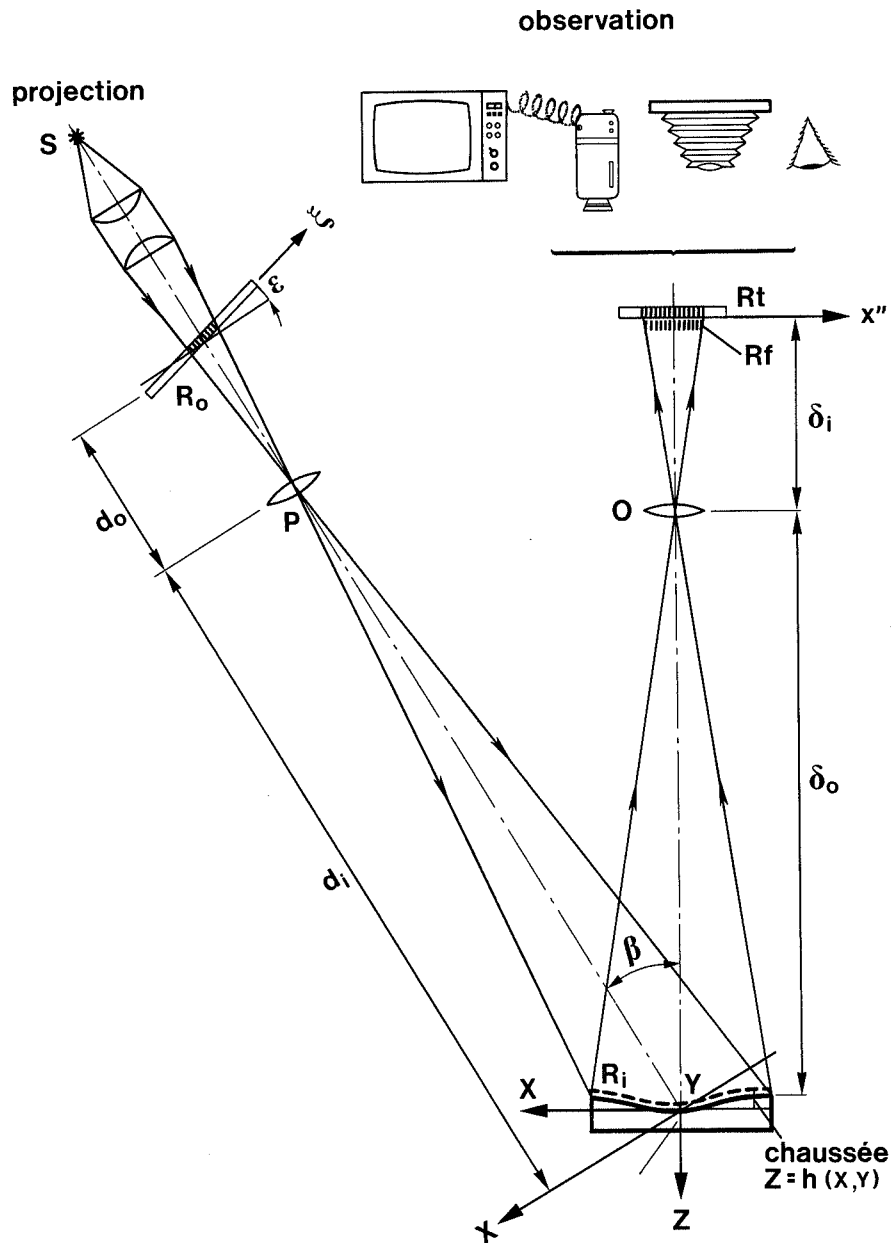


Fig.3. - Système optique du moiré de projection.

En d'autre termes, lorsque le pas du réseau témoin  $R_t$  et du réseau déformé  $R_f$  ne sont pas les mêmes, des franges noires apparaissent aux endroits où une bande noire de l'un des réseaux vient se placer entre deux bandes noires de l'autre réseau (cf. fig.2).

On peut décomposer schématiquement le système optique en deux sous-systèmes, dont l'un constitue la projection et l'autre l'observation. La contrainte principale imposée à la projection est de produire un éclair-

ment suffisant et uniforme sur l'ensemble de la surface à analyser. De plus, pour obtenir une image aussi nette que possible dans le plan XY, le réseau  $R_0$  doit être incliné par rapport à la perpendiculaire à l'axe optique d'un angle  $\varepsilon$  tel que

$$\frac{\tan \varepsilon}{\tan \beta} = \frac{1}{g} \quad (\text{R\`egle de Scheimpflug})$$

### 3.2. Interprétation des franges de moiré observées

La formation du moiré de projection ayant été décrite de manière générale, il faut maintenant examiner les conditions nécessaires pour l'obtention de franges représentant des lignes de niveau d'un objet.

La technique la plus utilisée consiste à projeter, pour la fabrication du réseau témoin  $R_t$ , un réseau  $R_0$  de pas constant et de ne pas considérer la rotation  $\varepsilon$  de ce réseau, les objectifs O et P se trouvant à la même distance  $\delta_0$  du plan de référence. On obtient alors un pas constant le long de X' (fig.4) et on peut observer  $n_1$  lignes sur le segment om.

Lors de la phase d'exploitation, la surface plane située dans XY est remplacée par l'objet à étudier. Le nombre de lignes contenues dans le segment om est maintenant  $n_2$ . La différence  $(n_2 - n_1)$  entre les deux séries de lignes qui interfèrent, donne le nombre de franges N.

On peut écrire

$$n_{2p} - n_{1p} = Np \quad (1)$$

ou

$$X'(T) - X'(S) = Np \quad (2)$$

L'annexe 1 contient les transformations et relations d'optique géométrique qui servent à établir l'altitude et la position du point M'. Il ressort de ces résultats que l'altitude  $ZM'$  est fonction de l'abscisse du point.

$$Z_{M'} = \frac{Nps^2}{b \cdot d_i - Nps \left( \frac{\delta_0}{d_i} - \frac{x'' \cdot b}{\delta_i \cdot d_i} \right)} \quad (3)$$

avec

$$s = d_i - \frac{x'' \cdot b \cdot \delta_0}{\delta_i \cdot d_i}$$

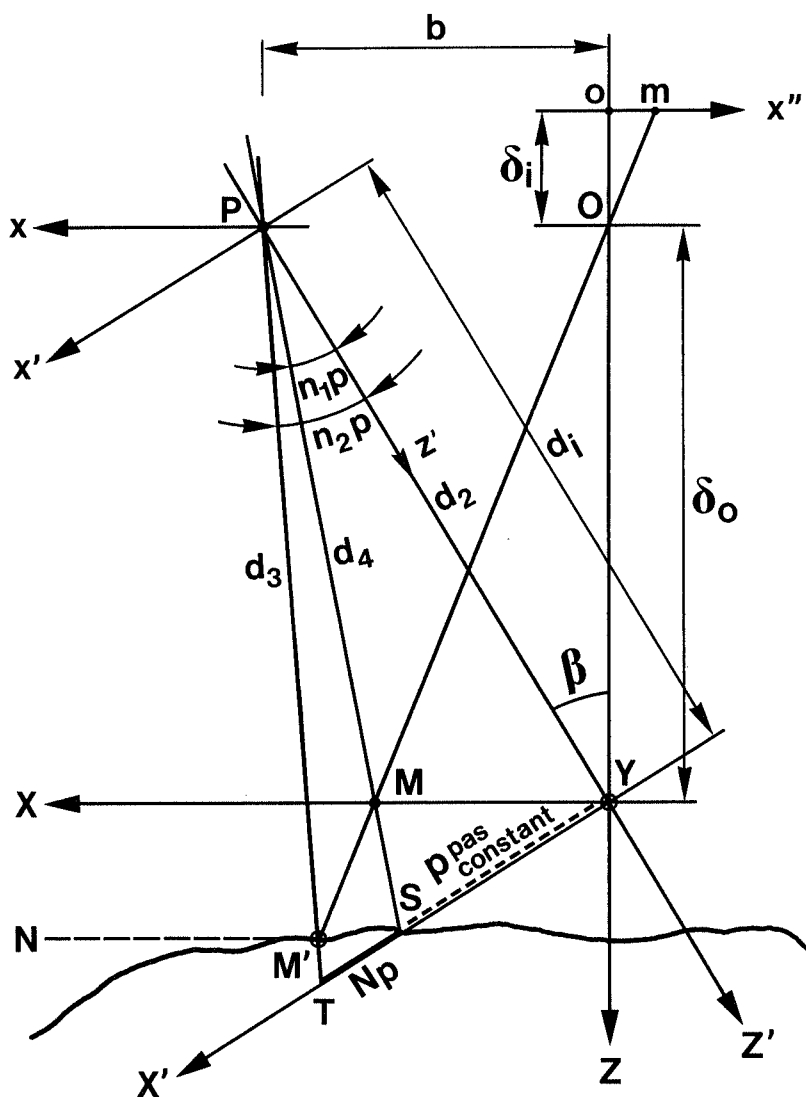


Fig.4. - Projection d'un pas  $p$  constant de long de  $X'$ .

Les franges ne représentent donc pas des lignes de niveau, mais proviennent de l'intersection de l'objet avec une famille de surfaces cylindriques, ce qui complique le traitement de l'information, en particulier l'interprétation qualitative. Le tracé des rayons de la figure 5 visualise la forme de ces surfaces cylindriques.

L'inclinaison de la projection a transformé le réseau de pas constant  $R_0$  en un réseau de pas variable dans le plan  $XY$  (fig.6).

Si l'on choisit un réseau  $R_0$  tel que son image dans le plan  $XY$  donne un pas constant (fig.7), on peut démontrer par le développement ci-dessous, que l'altitude du point  $M'$  ne dépend plus de l'abscisse. En d'autres termes, l'objet est alors coupé par une série de plans.

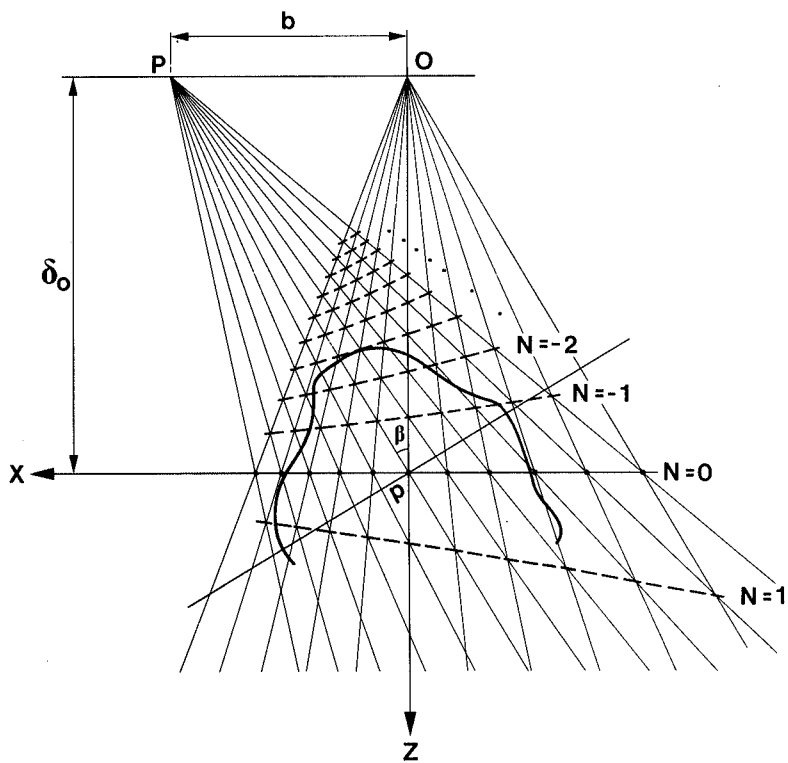


Fig.5. - Trace dans le plan XY des surfaces d'ordre N.

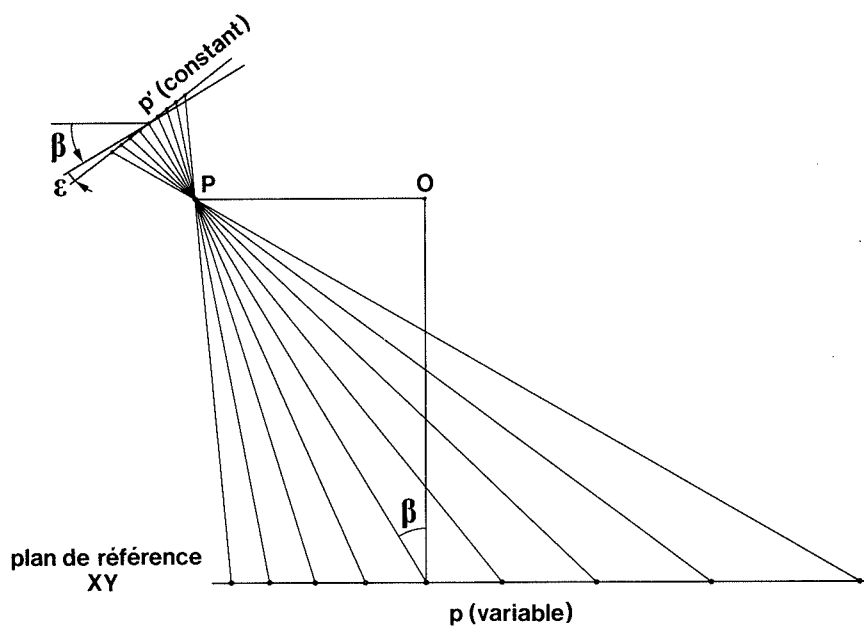


Fig.6. - Pas projeté variable dans le plan XY.



Dans XZ,  $d_1$  est donné par

$$Z = \frac{(\delta_0 + Z_{M'}) (X - b)}{\left(\frac{\delta_0 + Z_{M'}}{\delta_i}\right) x'' - b} - \delta_0$$

$$\Rightarrow X(T) = \frac{\delta_0 \left[ \frac{(\delta_0 + Z_{M'})}{\delta_i} x'' - b \right]}{(\delta_0 + Z_{M'})} + b \quad (6)$$

$$N_p = (6) - (5) = \frac{b \cdot Z_{M'}}{\delta_0 + Z_{M'}}$$

On en déduit l'altitude du point  $M'$  situé sur la frange d'interférence d'ordre  $N$

$$\boxed{Z_N = Z_{M'} = \frac{N_p \cdot \delta_0}{b - N_p}} \quad (7)$$

La figure 8 montre une représentation simplifiée des plans créés avec le réseau  $R_0$  *ad hoc*.

Cette technique doit être privilégiée, car elle permet une interprétation simplifiée des franges de moiré, même si la distance entre les plans augmente progressivement en s'éloignant des objectifs  $P$  et  $O$  en raison de la faible divergence des faisceaux.

Il est à remarquer que des plans équidistants ne pourraient être obtenus qu'avec un système constitué d'une projection et d'une observation parallèles (fig.9), ce qui nécessiterait une optique de la taille de l'objet.

En résumé, les deux conditions principales à satisfaire pour observer un moiré de projection constitué par des franges d'interférences représentant des lignes de niveau sont les suivantes:

1. l'objectif de projection  $P$  et l'objectif d'observation  $O$  doivent se trouver à une même distance du plan de référence  $XY$ ;
2. le pas du réseau doit être constant dans le plan de référence  $XY$ .

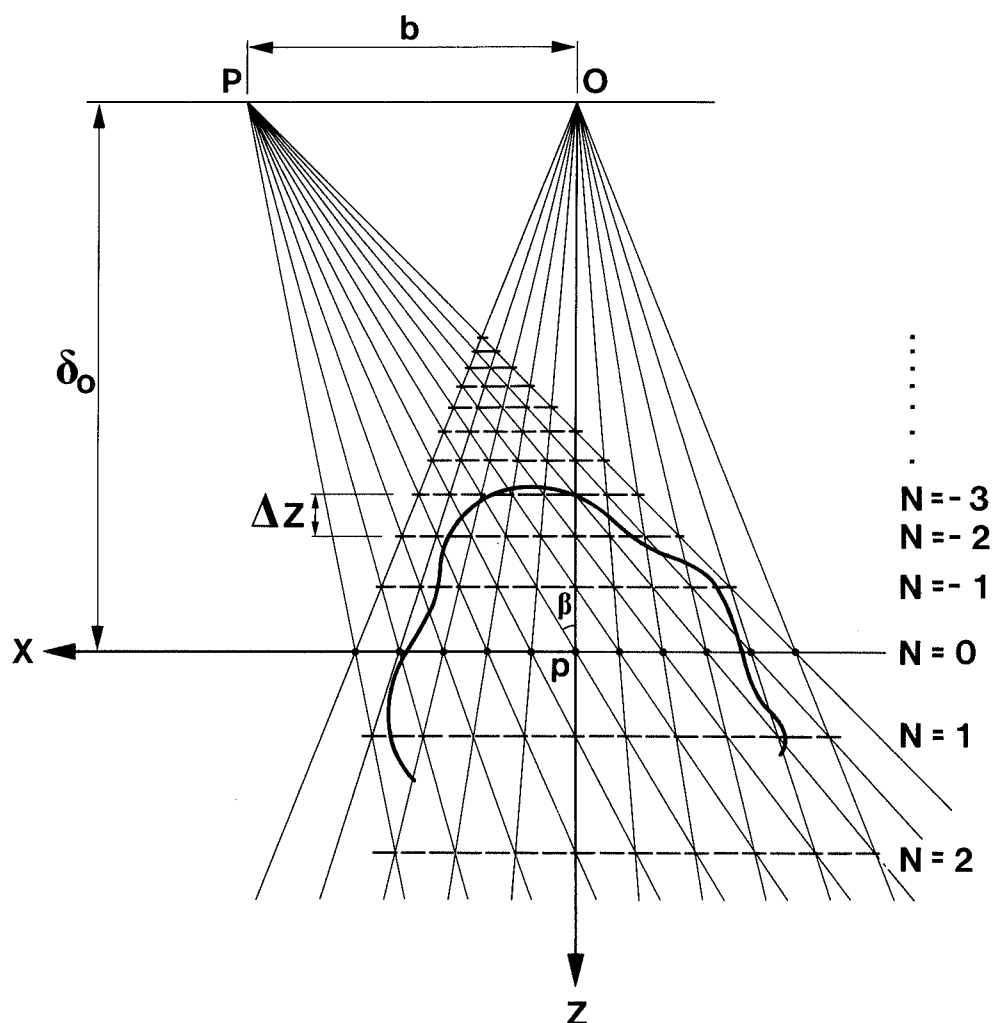


Fig.8. - Traces dans le plan XY des surfaces planes d'ordre N obtenue avec un réseau produisant un pas constant le long de X.

Si la première condition ne pose pas de problème particulier, la deuxième condition impose le recours à un procédé spécial pour l'obtention du réseau  $R_0$  *ad hoc* :

- Un réseau de la taille de la surface à analyser et de période constante est placé au niveau du plan de référence XY. Ce réseau uniformément éclairé est enregistré sur une plaque photographique dans le plan image de l'objectif de projection P. On obtient ainsi le réseau à projeter  $R_0$  souhaité. Le réseau témoin est réalisé de manière similaire par l'intermédiaire de l'objectif d'observation O. Les deux trames correspondent alors à une projection centrale du réseau de pas  $p$  par les points P et O.

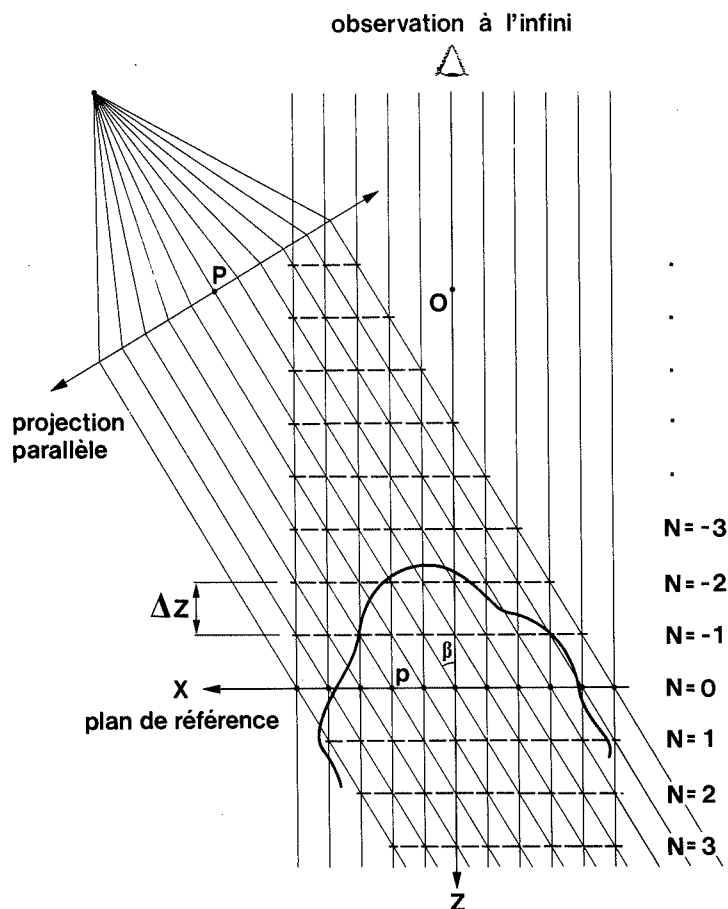


Fig.9. - Intersection d'un objet avec des plans équadistants d'ordre N.

### 3.3. Calcul des coordonnées d'un point de la route

Sous 3.2 l'altitude d'un point a pu être établie par l'interprétation des franges de moiré.

Les coordonnées du point M' (fig.7) dans le système de référence XYZ lié au dispositif sont:

$$X_{M'} = x'' \frac{\delta_o \cdot b}{\delta_i(b - Np)} \quad (8)$$

$$Y_{M'} = y'' \frac{\delta_o \cdot b}{\delta_i(b - Np)} \quad (9)$$

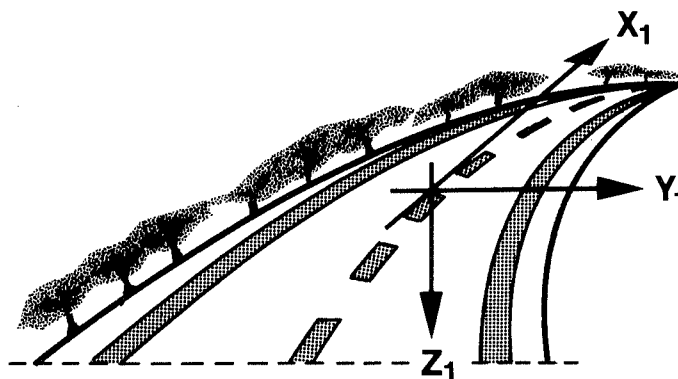
$$Z_{M'} = \frac{Np \cdot \delta_0}{(b - Np)} \quad (10)$$

$x''$  est l'abscisse du point  $M'$  sur la plaque,  
 $y''$  est l'ordonnée du point  $M'$  sur la plaque,  
 $N$  est l'ordre de la frange sur laquelle se trouve le point  $M'$ .

Soit (fig.10a) :

- $X_1$  l'axe longitudinal, représenté au temps  $t$  par la tangente à la trajectoire de la route, matérialisée par le marquage de la chaussée;
- $Y_1$  l'axe transversal perpendiculaire à  $X_1$  dans le plan de la route;
- $Z_1$  la normale au plan de la route.

Fig.10.a. - Système d'axes liés à la route.



Le passage du système d'axes XYZ liés au dispositif au système d'axes liés à la route se fait par trois rotations successives  $\psi$ ,  $\phi$ ,  $\vartheta$  (fig.10.b).

$\vartheta$  est l'angle entre  $Y$  et le plan de la route  $X_1Y_1$   
 $\phi$  est l'angle entre  $X$  et le plan de la route  $X_1Y_1$   
 $\psi$  est l'angle entre  $Z$  et la normale  $Z_1$  au plan de la route.

Les termes de la matrice de transformation résultante  $A$  sont:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

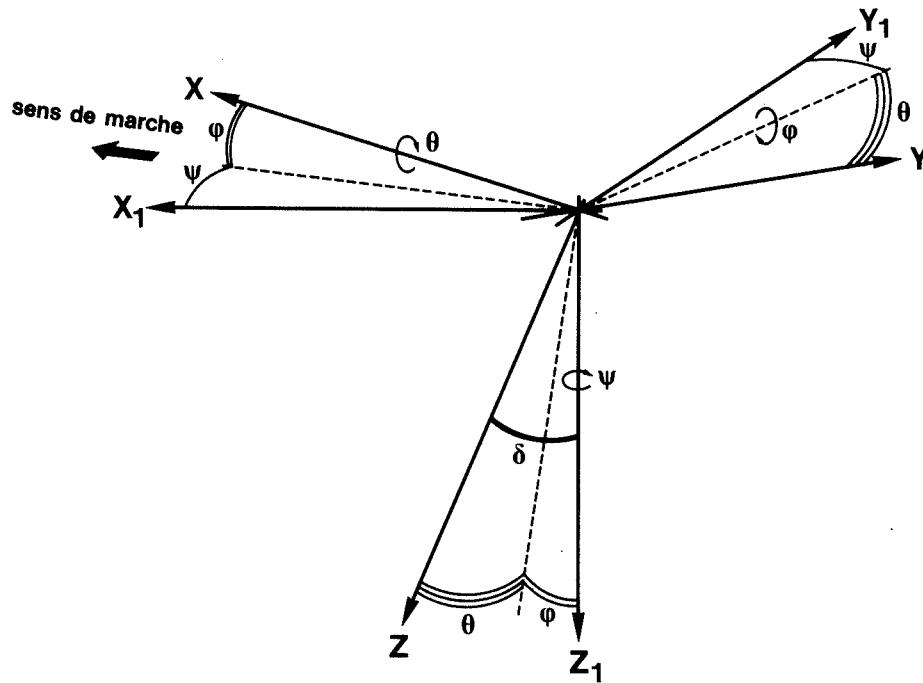


Fig.10.b. - Passage du système d'axes XYZ liés au dispositif au système d'axes  $X_1Y_1Z_1$  liés à la route.

avec:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \cos\psi \cos\varphi \\
 a_{12} &= \sin\psi \cos\varphi \\
 a_{13} &= \sin\varphi \\
 a_{21} &= \cos\psi \sin\varphi \sin\vartheta - \sin\psi \cos\vartheta \\
 a_{22} &= \sin\psi \sin\varphi \sin\vartheta + \cos\psi \cos\vartheta \\
 a_{23} &= \cos\varphi \sin\vartheta \\
 a_{31} &= \cos\psi \sin\varphi \cos\vartheta + \sin\psi \sin\vartheta \\
 a_{32} &= \sin\psi \sin\varphi \cos\vartheta - \cos\psi \sin\vartheta \\
 a_{33} &= \cos\varphi \cos\vartheta
 \end{aligned}$$

Soient les vecteurs colonnes

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \underline{X}_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

On peut écrire

$$\underline{X} = [A]^T \underline{X}_1 \tag{11}$$

L'angle  $\psi$  (fig.10.b) représente la déviation entre le chemin parcouru par le véhicule de mesure et la tangente à la trajectoire de la route. Cet angle peut être considéré comme nul, car dans la pratique il reste inférieur à 1 degré. Il suffit alors de considérer les deux angles de tangage et de roulis  $\varphi$  et  $\vartheta$ .

La méthode du moiré ne permet pas de mesurer directement ces deux angles, mais la relation entre les angles mesurés  $\delta, \alpha$  (fig.11) et les angles  $\varphi, \vartheta$  nécessaires à la transformation de coordonnées est donnée par les équations (12) et (13).

$$\operatorname{tg}\vartheta = \operatorname{tg}\delta \sin\alpha \quad (12)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{tg}\delta \cos\alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta \sin^2\alpha}} \quad (13)$$

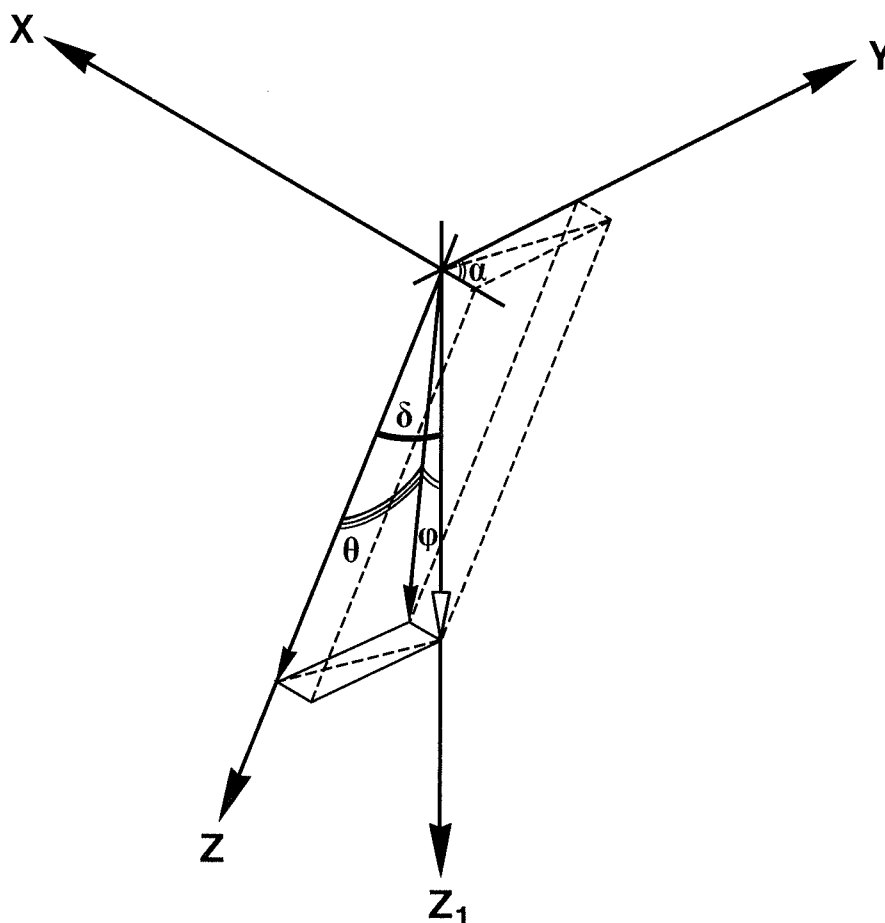


Fig.11. - Représentation mettant en relation les angles de tangage et de roulis  $\varphi, \vartheta$  avec les angles mesurés  $\delta, \alpha$ .

Les termes de la nouvelle matrice de transformation simplifiée sont:

$$\begin{array}{lll} a_{11} = \cos\delta \cos\alpha & a_{21} = -\cos\delta \sin\alpha & a_{31} = \sin\delta \\ a_{12} = \sin\alpha & a_{22} = \cos\alpha & a_{32} = 0 \\ a_{13} = -\sin\delta \cos\alpha & a_{23} = \sin\delta \sin\alpha & a_{33} = \cos\delta \end{array}$$

### 3.4. Particularité de la technique appliquée à l'analyse dynamique d'une chaussée

Une représentation intéressante d'un objet tridimensionnel est la carte topographique. Elle est constituée par des lignes de niveau qui sont des contours de l'objet établis à intervalle régulier et projetés sur un même plan normal à l'axe d'observation (fig.12).

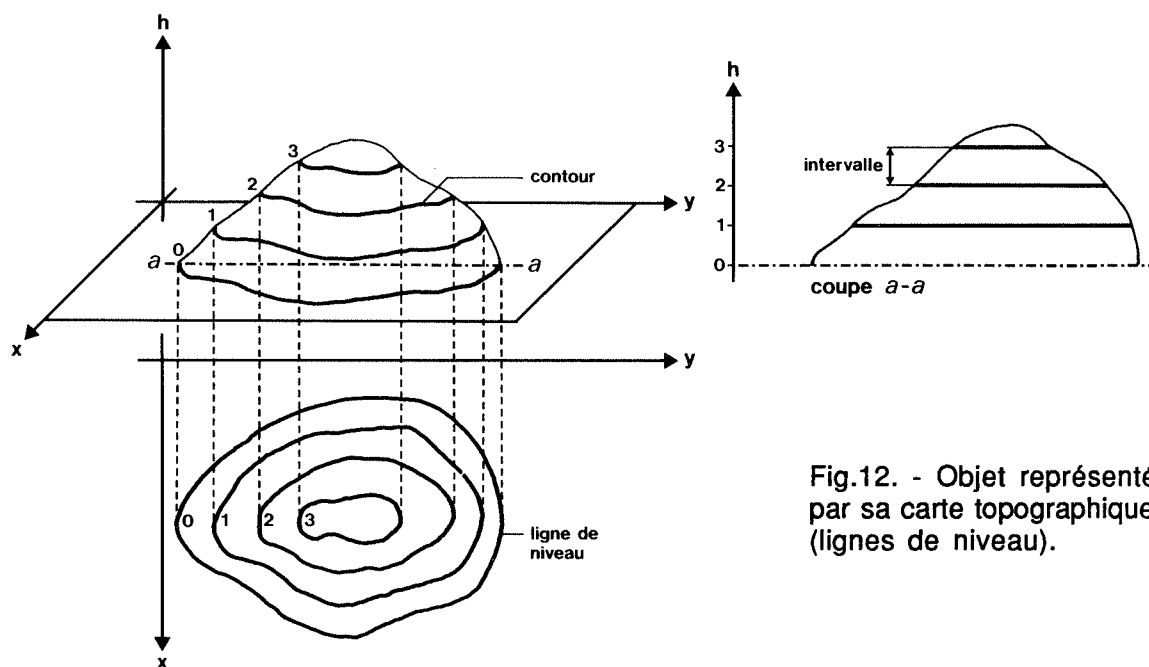


Fig.12. - Objet représenté par sa carte topographique (lignes de niveau).

A partir d'une telle carte, il est possible de déterminer l'altitude d'un point de l'objet ou de reconstituer des coupes de l'objet dans une direction choisie. Le nombre et la forme des lignes de niveau dépend de l'intervalle et de l'orientation des plans par rapport à l'objet.

Lorsque la surface étudiée est une chaussée, la forme du revêtement peut être assimilée en bonne approximation à une surface réglée, car la variation du profil en travers sur une petite portion longitudinale de la route (par exemple sur une longueur d'un mètre) peut être considérée

comme négligeable. Si l'on place le plan de référence du dispositif parallèlement aux génératrices de cette surface, les lignes de niveau observées sont des droites plus ou moins rapprochées (fig.13).

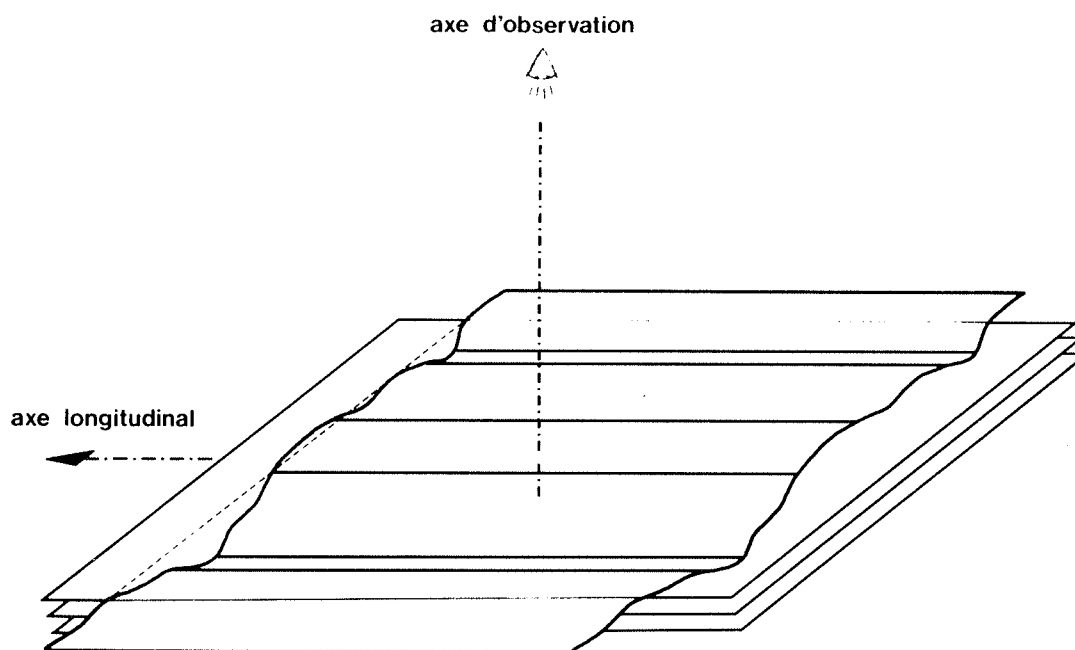


Fig.13. - Intersection de la chaussée avec des plans parallèles aux génératrices de la surface.

Lors d'une mesure dynamique, la caisse du véhicule subit de nombreux mouvements inévitables qui modifient constamment la hauteur sur sol du dispositif. Ces mouvements induisent un changement continu de l'assiette et par voie de conséquence de la position ou de la forme des franges. Certains modes d'enregistrement, trop lents pour relever de tels déplacements, ne peuvent plus entrer en considération et le travail d'interprétation qualitative devient singulièrement compliqué.

Pour s'affranchir de ces difficultés et mieux tirer profit de la forme caractéristique de la surface d'une chaussée, le système est conçu de telle sorte que les plans optiques générés coupent la surface avec une légère obliquité (fig.14).

Cette configuration atténue la sensibilité de la méthode aux mouvements de l'axe d'observation par rapport à la chaussée. Ni les mouvements de tangage, qui ne provoquent qu'une légère translation des franges, ni les mouvements de roulis, qui entraînent une rotation des franges, n'altèrent plus la qualité de la prise de vue de manière significative.

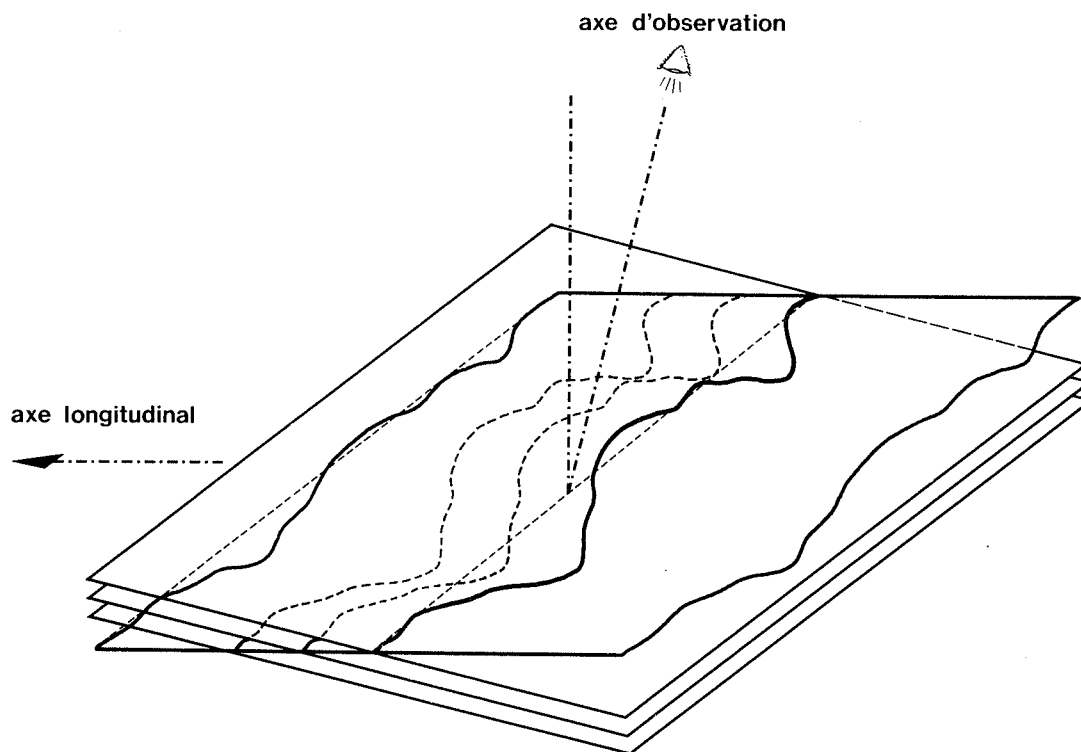


Fig.14. - Intersection de la chaussée avec des plans obliques.

Ce procédé présente un autre avantage décisif: l'interprétation de la figure de moiré devient accessible au non-spécialiste, car la frange représente une anamorphose du profil en travers. Le problème de la distinction entre un creux et une bosse, à partir de lignes de niveaux, ne se pose plus.

On doit remarquer qu'en découpant la chaussée avec des plans obliques, les points d'une frange n'ont pas la même cote longitudinale. Dans le cas de l'étude de surfaces réglées, cet inconvénient peut être facilement surmonté: il suffit de prendre la projection de la frange dans un plan vertical. Par contre si le défaut visualisé présente une forme quelconque, il devient nécessaire de faire appel à un traitement plus laborieux du champ de franges observé.

## 4. ETUDE EXPERIMENTALE

### 4.1. Essais préliminaires

La phase initiale de cette recherche a consisté à réaliser, sur bancs optiques, un dispositif de laboratoire modulaire. Chacun des éléments de l'appareil de mesure possédant plusieurs degrés de liberté, les possibilités d'assemblage des composants devaient être nombreuses et simples.

L'intérêt principal de ces essais préliminaires s'est porté sur l'étude détaillée des qualités de l'image du moiré créé à l'aide de ce dispositif. En effet, ce sont les franges de moiré qui sont le vecteur de l'information désirée et il importe donc que celles-ci soient visualisées de manière optimale. Par une première série d'essais, on a pu mieux évaluer l'influence qu'ont certaines caractéristiques du bitume telles que la texture (fonction du degré d'usure), l'absorption et la réflexion lumineuses (surface mate ou brillante), la propreté de la surface (présence de poussières), humidité... Des tests effectués sur des éprouvettes de bitume ainsi que sur des surfaces analogues montrent que la puissance de la projection mérite une étude approfondie (puissance, uniformité...) en raison de la très forte absorption de la lumière par le bitume. La photo 1 confirme qu'il est possible d'interpréter des franges sur des supports de plus en plus foncés (1 → 6).

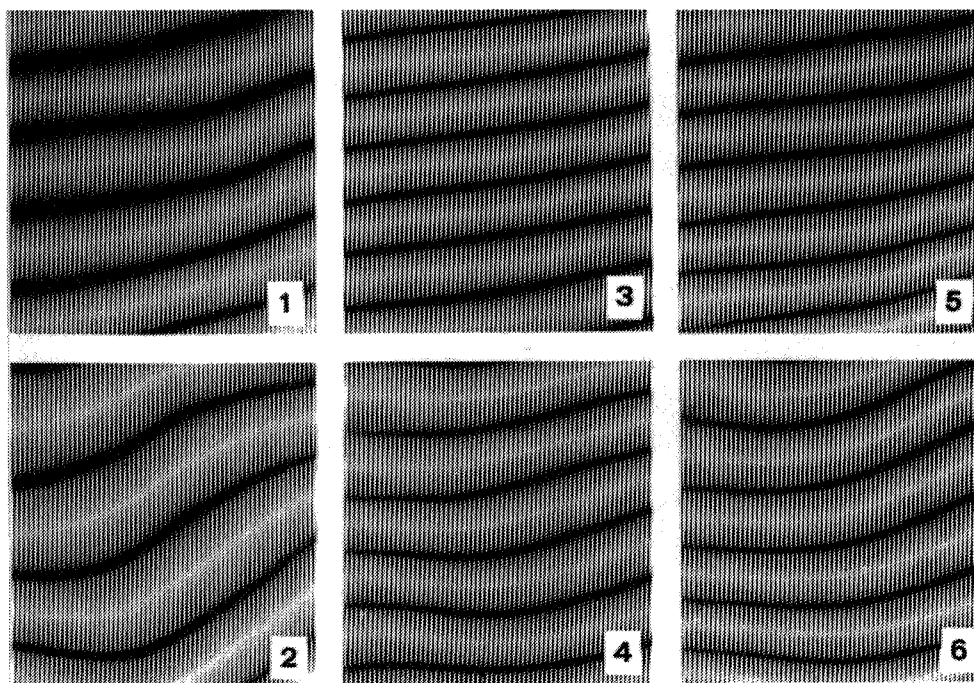


Photo 1.

Les équations établies au paragraphe 3.2 démontrent qu'avec des trames à période constante, la valeur de l'altitude d'un point établie par interprétation d'une figure de moiré dépend de sa position ( $x''$ ,  $y''$ ) sur l'image. Pour contrôler la précision de ces équations et pour faciliter le choix de paramètres optimaux, on a eu recours à des mesures de la forme d'objets simples tels que des plans inclinés (photo 2), des portions de cylindres (photo 3), etc.

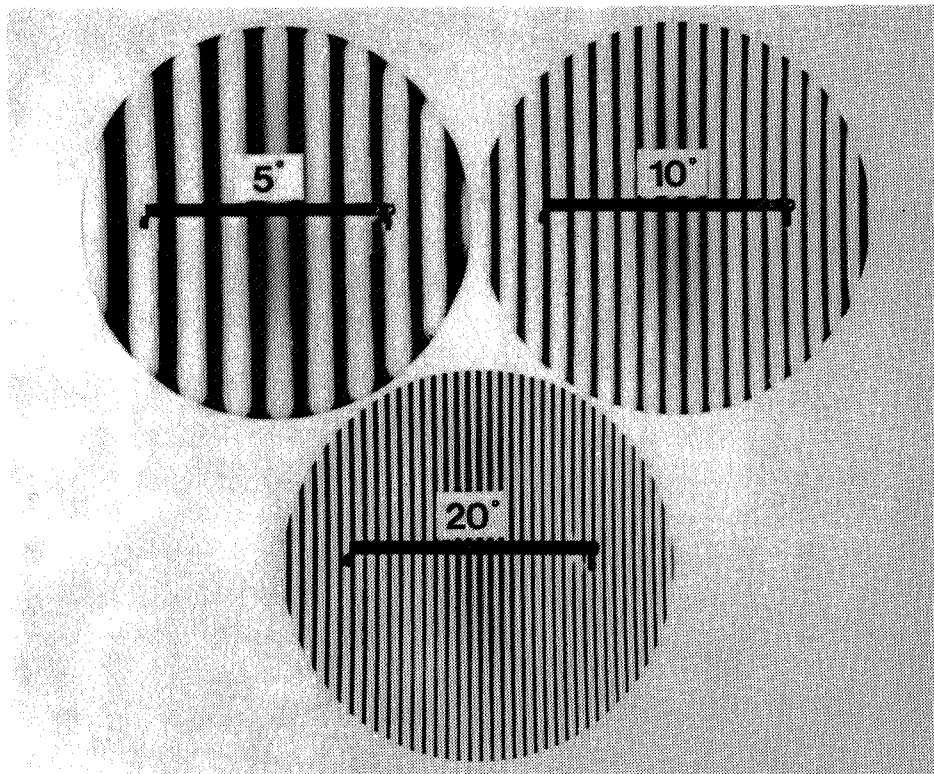


Photo 2.

Les résultats de ces mesures ont été comparés à ceux obtenus par une mesure au calibre ou à ceux provenant de simulations par ordinateur. La figure 15 représente le résultat de la digitalisation et de l'interprétation de la photo 3.

L'annexe 2 contient un exemple d'une comparaison *mesure-simulation* dans le cas de l'étude d'un plan incliné à 10 degrés par rapport à la référence.

D'autres essais préliminaires ont eu pour but d'effectuer des mesures à partir de la forme de la frange. Des modèles d'ornières ont montré qu'il est possible de mesurer des flèches millimétriques (2 mm, 3 mm...).

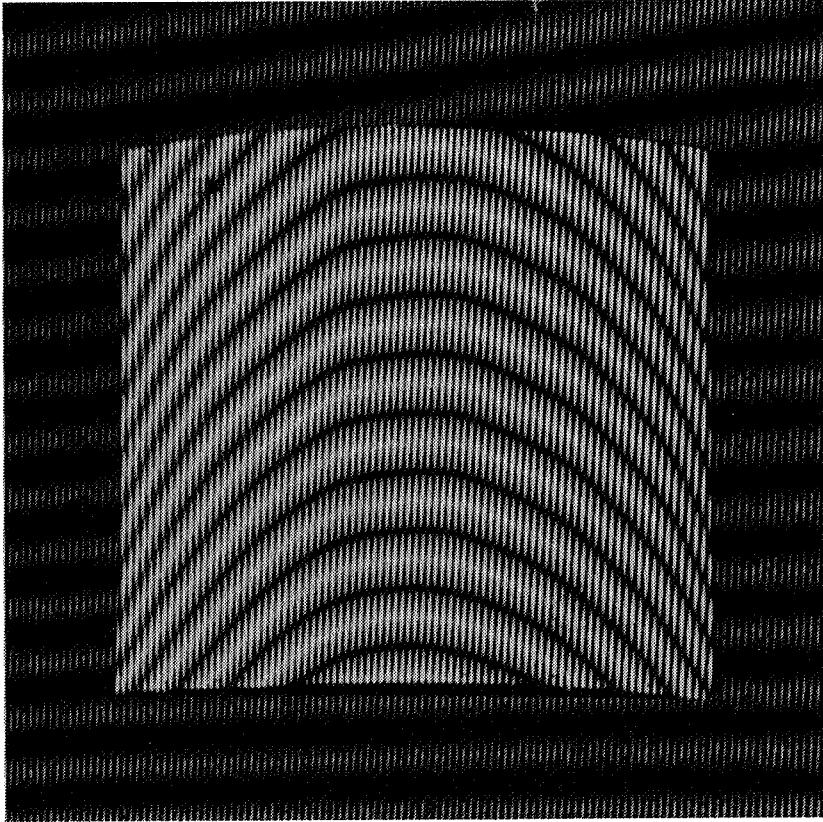
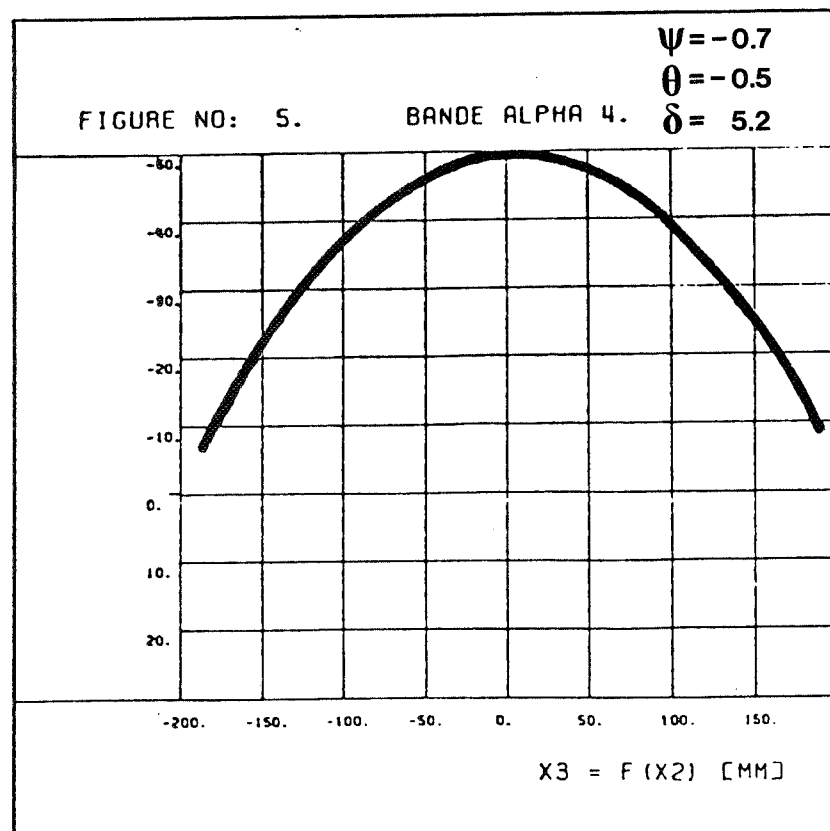


Photo 3.

Fig.15. - Dessin du profil d'une portion de cylindre à partir de la digitalisation des franges de moiré.



## 4.2. Essais en halle

L'étape suivante a consisté à attribuer des valeurs optimales aux différents paramètres intervenant dans l'établissement de la topographie sur la base des résultats des essais préliminaires. En tenant compte de certaines exigences pratiques (par exemple encombrement maximal disponible dans le véhicule utilisé pour le relevé) ou fixées par le cahier des charges (par exemple la sensibilité de la mesure du profil en travers), on a assemblé un deuxième dispositif destiné à des essais mobiles de mesure.

La période du réseau a été fixée en considérant d'une part les granularités usuelles du revêtement (microtexture), d'autre part les contraintes qu'implique la réalisation de réseaux de bonne qualité par photographie.

Le choix de l'angle entre la projection et l'observation, ainsi que la distance entre les objectifs et la chaussée, tiennent compte des dimensions admises pour le véhicule.

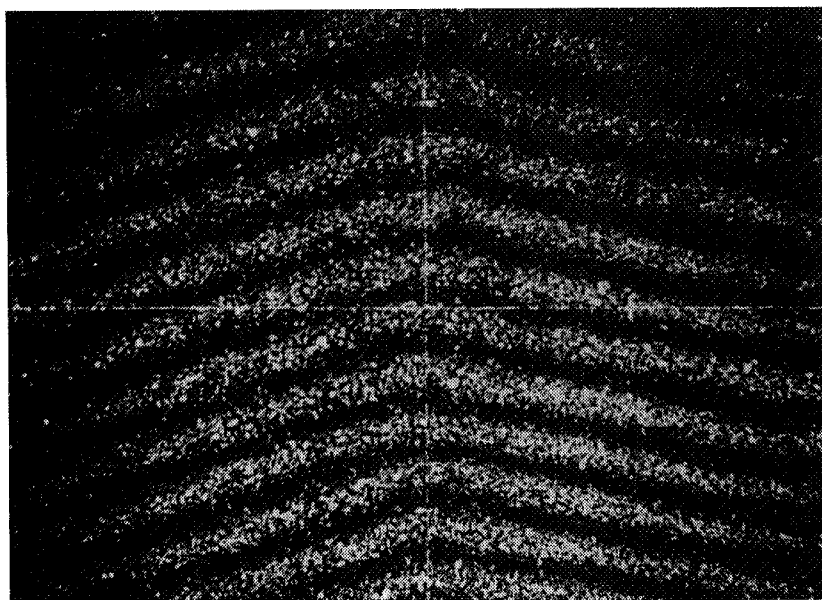


Photo 4.

Cette série d'essais en laboratoire a eu pour but de procéder au relevé d'une ornière réelle de 1 à 2 cm créée dans une portion de revêtement d'enrobé AB 10 de 1,5 × 8 mètres. La comparaison reproduite à la

figure 16 entre la mesure mécanique (points relevés au calibre symbolisés par des étoiles) et la mesure à partir de la figure de moiré digitalisée (ligne continue de la figure 16 et photo 4) a montré une concordance très satisfaisante. Le dispositif était stationnaire lors du relevé utilisé pour cette comparaison.

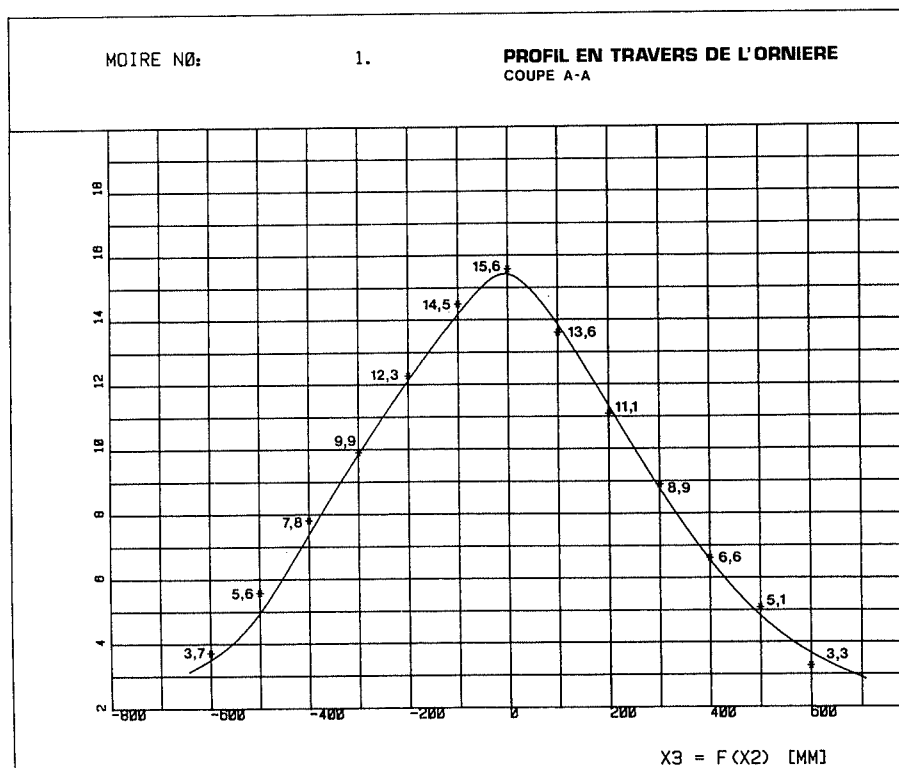


Fig.16. - Comparaison entre la courbe obtenue par digitalisation d'une frange de moiré et le relevé au calibre de quelques points du profil d'une ornière.

Pour évaluer l'influence de la marche du véhicule sur la qualité ou sur le mouvement des franges, un système de prise de vue vidéo a été intégré au dispositif. Il a dès lors été possible d'effectuer des relevés dynamiques sur toute la longueur du modèle en appliquant au dispositif en mouvement des vibrations et des chocs.

La dégradation intermittente de la qualité visuelle du moiré que l'on a pu constater lors de ces essais confirme que l'interprétation peut devenir extrêmement difficile en particulier si l'éclairage n'est pas uniforme d'un bord à l'autre du cliché (voir par exemple le bord gauche de la photo 4). La solution qui consiste à construire un projecteur spécialement adapté aux dimensions de la surface devenait dès lors inévitable.

## 5. CONCEPTION ET REALISATION D'UN PROTOTYPE D'APPAREIL DE MESURE

### 5.1. Dispositif de relevé du profil en travers

Les essais de laboratoire ont fourni de nombreuses informations sur les caractéristiques et les performances optiques des composants d'un système basé sur le principe du moiré de projection. Ils ont été un préalable indispensable à la conception et à la réalisation d'un prototype d'appareil de saisie destiné à être engagé pour le relevé *in situ* (fig.17). Ils ont notamment permis de confirmer que la meilleure uniformité de l'éclairage s'obtient avec les objectifs de projection et d'observation placés selon un axe orienté dans la direction de mouvement du camion, c'est-à-dire dans l'axe de la route, car c'est dans cette position que la variation de l'angle entre les rayons extrêmes du champ utile est la plus faible.

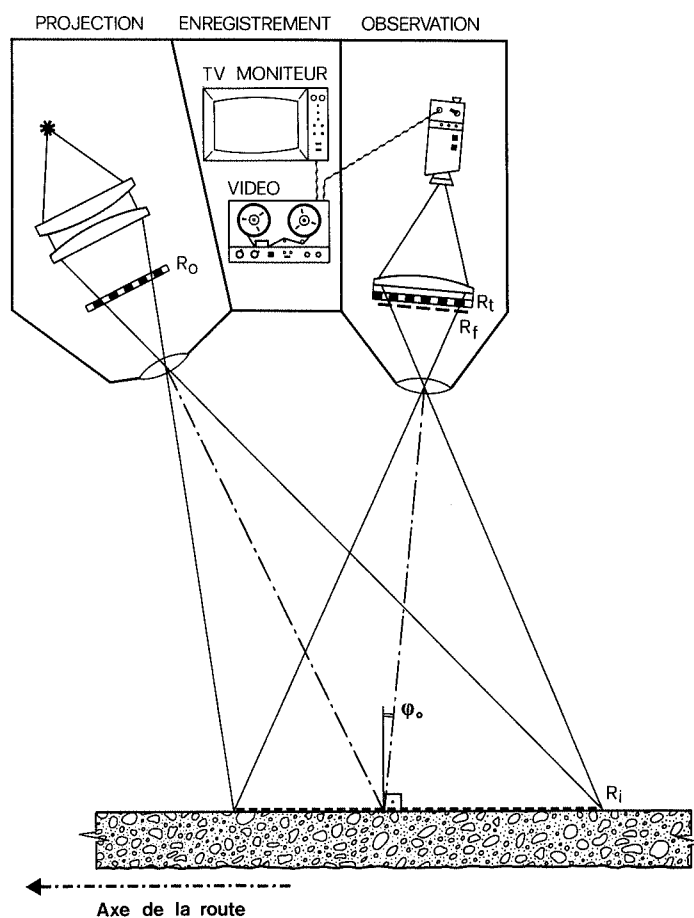


Fig.17. - Position de la projection et de l'observation par rapport à l'axe de la route.

D'autre part, sous 3.4, on a montré qu'une légère inclinaison des plans par rapport à la chaussée est la position du système optique la plus favorable: elle diminue l'influence de l'assiette du camion sur le moiré observé et simplifie l'interprétation des franges dont chacune représente une anamorphose du profil en travers. Le défaut est amplifié d'un facteur  $k$  qui dépend de l'angle d'inclinaison de l'observation (fig.18). L'angle  $\varphi_0 = 5^\circ$  choisi pour l'inclinaison résulte d'un compromis entre une accentuation du défaut suffisante et une sensibilité réduite aux variations autour de cet angle.

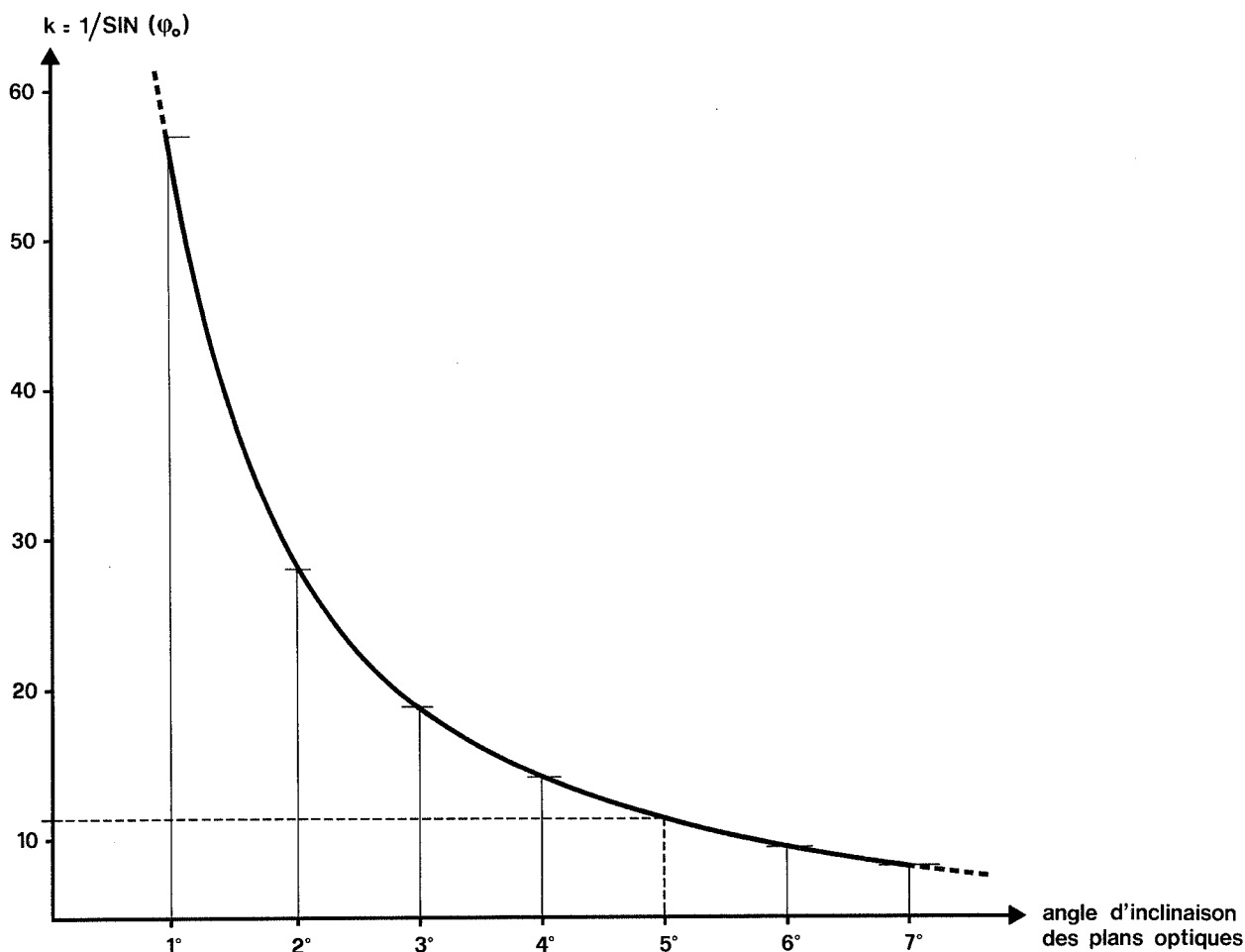


Fig.18. - Facteur  $k$  d'amplification du profil observé par rapport à l'angle d'inclinaison des plans optiques.

Les principales caractéristiques des composants de la projection et de l'observation sont examinées aux paragraphes 5.1.1 et 5.1.2.

Dans l'annexe 3, on trouve une procédure générale appliquée lors du choix des différentes valeurs à attribuer aux paramètres utilisés pour la détermination de la topographie d'objets par moiré de projection: le tableau III contient les valeurs choisies pour l'étude de la surface d'un revêtement routier.

|  |             |         |
|--|-------------|---------|
| Groupe mobile d'alimentation                           |             | 2,5 kW  |
| Puissance de la projection (lampes)                    |             | 1,6 kW  |
| Focale de la lentille de projection P                  |             | 90 mm   |
| Focale de la lentille d'observation O                  |             | 28 mm   |
| Distance entre les deux objectifs                      | b           | 800 mm  |
| Distance des objectifs au plan de référence XY         | $\delta_o$  | 2200 mm |
| Angle de projection                                    | $\beta$     | 20°     |
| Pas du réseau dans le plan de référence                | p           | 4 mm    |
| Equidistance nominale $\Delta Z_{nom}$ entre les plans |             | 11 mm   |
| Angle d'obliquité des plans                            | $\varphi_o$ | 5°      |
| Rapport b/p  |             | 200     |

Tableau III - Caractéristiques principales des éléments du dispositif de mesure.

### 5.1.1. Composants de la projection

Les système optique le plus courant en projection diascopique est de type Koehler: un condenseur image la source lumineuse dans l'objectif de projection qui lui-même crée une image du transparent sur l'écran (fig.19).

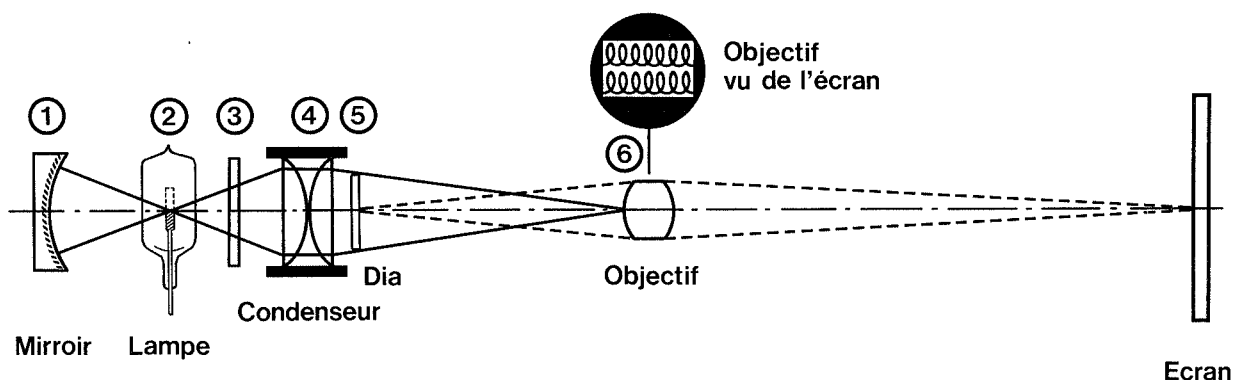


Fig.19. - Système de projection.

Cette configuration a été retenue pour cette application en tenant compte dans le choix des composants des conditions particulières de l'engagement du dispositif: pour produire un éclairage suffisamment uniforme au niveau du revêtement sur une surface de  $4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , le plus simple et le plus économique est une projection constituée par quatre systèmes *source-condenseur* placés radialement autour d'un même objectif (annexe 4).

### Source ponctuelle (2)

La source idéale pour une bonne projection devrait être ponctuelle et brillante. La lampe à arc à vapeur de mercure et de xénon utilisée en laboratoire remplit le mieux ces conditions ( $1.5 \times 3 \text{ mm}^2$ ,  $320 \text{ cd/mm}^2$ ). Mais la pression élevée à l'intérieur de l'enveloppe du verre (50-70 atmosphères) rend très dangereuse l'utilisation d'une telle lampe dans un véhicule soumis à de continus chocs et vibrations. Aussi lui a-t-on préféré une lampe à filament *halogène* (400 W) placée au foyer d'un miroir concave (1). Ce système possède une bonne efficacité lumineuse.

### Condenseur (4)

Le condenseur, formé de deux lentilles plano-convexes ( $f = 90 \text{ mm}$ ) dont les faces courbes sont adjacentes, agrandit le filament 1.5 fois. La face de sortie du condenseur présente une luminance absolument homogène. Il faut donc placer le transparent à projeter près du condenseur pour assurer un éclairage uniforme. Avec un dispositif comprenant 4 systèmes *source-condenseur* pour une seule trame (voir annexe 4), cela n'est que partiellement réalisé. Pour éviter un réchauffement excessif de la première lentille, un filtre de chaleur (3) est inséré entre la lampe et le condenseur.

### Réseau à projeter (5)

Le procédé le plus simple pour la fabrication d'un réseau à projeter consiste à dessiner une trame de la taille de l'objet. Avec certaines imprimantes, il est possible d'obtenir des sorties graphiques sur papier mat d'une largeur de 1 m : pour réaliser une trame, il suffit de fixer le pas par un petit programme d'ordinateur.

Pour cette application, un réseau avec une période de 4 mm a été imprimé sur une bande de papier de 4 m de long. Celle-ci a ensuite été placée dans le plan de référence et son image enregistrée sur la plaque

de verre ⑤ constituant le réseau à projeter. Au niveau de cette plaque, le pas n'est plus constant, mais varie autour de 6 lignes/mm. Pour maintenir un contraste suffisant à la projection, il n'est pas judicieux d'utiliser un réseau plus dense.

### Objectif ⑥

L'objectif de projection doit former une image agrandie de la trame sur l'objet. Son ouverture est donnée d'une part par la taille de l'image de la source car il doit capter tous les rayons du faisceau sortant du condenseur, d'autre part l'ouverture doit être suffisamment réduite pour assurer une bonne profondeur de champ. Tenant compte de l'aspect particulier du transparent projeté, le contraste des franges peut être amélioré si l'on remplace l'ouverture circulaire de l'objectif par une ouverture rectangulaire dont le côté allongé est parallèle aux traits du réseau.

La taille de la surface à analyser et la distance maximale entre le dispositif de mesure et la chaussée sont des critères qui ont orienté le choix vers un objectif grand-angulaire. La focale de 90 mm assure un grandissement acceptable et une profondeur de foyer qui autorise une légère erreur de la rotation de la trame avant l'enregistrement.

#### 5.1.2. Composants de l'observation

Le système d'observation, de conception relativement simple, peut être décrit brièvement. Il sert à recueillir la lumière réfléchie par la chaussée. Au travers de l'objectif, l'image du réseau déformé selon la topographie du revêtement de la route se superpose au réseau de référence enregistré préalablement (fig.17). Le moiré résultant peut être visualisé sur un écran par une caméra vidéo et enregistré sur bande magnétique. Les caractéristiques principales de l'objectif de 28 mm de focale sont un angle de champ important et une pupille de sortie située vers l'avant qui peut être conjuguée avec celle de l'objectif de la caméra.

Pour éviter des problèmes liés à la diffraction et une perte de contraste excessive, le réseau de référence est limité à 20 lignes/mm.

L'albédo du bitume étant extrêmement faible (20%), il est nécessaire de placer une lentille collectrice contre la plaque pour diriger l'intégralité du faisceau lumineux dans l'objectif de la caméra.

### 5.1.3. Système d'enregistrement de l'information

Les divers systèmes entrant en ligne de compte pour la mémorisation des mesures sont:

- l'enregistrement photographique,
- l'enregistrement digital,
- l'enregistrement vidéo.

#### **Enregistrement photographique**

Ce support, qui permet une restitution d'image avec une définition (nombre de lignes/mm) excellente, n'a pas été retenu en raison de la longueur de film nécessaire pour le relevé d'un tronçon entier, de la complexité soit des opérations de synchronisation des vitesses du film et du véhicule, soit de l'interprétation.

#### **Enregistrement digital**

Les profils en travers utiles à l'ingénieur n'étant pas toujours connus à l'avance, l'enregistrement digital exigerait la conversion A/D en temps réel *in situ* de l'ensemble du relevé et produirait, sauf interprétation automatique immédiate, une quantité astronomique de données.

#### **Enregistrement vidéo**

Ce système est le plus adapté pour cette application car il permet d'enregistrer l'intégralité du tronçon parcouru sur un support simple. Une caméra vidéo, équipée d'un tube plumbicon (caractérisé par une faible rémanence, c'est-à-dire moins sensible à la vitesse de déplacement de l'objet visualisé), filme en continu la forme et le mouvement des franges au niveau du réseau de référence.

A une vitesse comprise entre 5 et 10 m/s, le véhicule avance d'une vingtaine de centimètres pendant la formation d'une image à la fréquence vidéo. Le déplacement quasi-perpendiculaire de la caméra par rapport à la route provoque un flou qui réduit considérablement la résolution de l'image. Cependant, la variation de la forme de la chaussée sur cette distance est insignifiante et les changements de l'assiette du camion pendant le temps correspondant ne produisent qu'une évolution relativement lente du champ des franges. Dans ces conditions, on peut

parler de stabilité de la frange porteuse de l'information sur le profil en travers.

Lors d'un choc important transmis par le véhicule, par exemple au passage d'un joint de pont, il faut compter avec une période de stabilisation d'environ deux secondes: il y a donc perte d'information sur une distance d'environ 10 à 20 mètres.

La définition de l'image est limitée par la bande passante du magnéto-scope: dans le cas de l'U-Matic, celle-ci est d'environ 5 MHz, ce qui correspond pour une image à 600 lignes à une définition d'environ 340 points par ligne.

La résolution verticale peut se calculer comme suit:

$$a) \quad 600 \text{ lignes} \times 0.3 (*) = 880 \text{ mm}$$

$$b) \quad \text{défaut sur frange} = \text{défaut réel} \times k \quad (k = \text{facteur d'amplification})$$

$$a) \text{ et } b) \Rightarrow \text{RESOLUTION VERTICALE} = \frac{880 \text{ mm}}{600 \times 0.3 \times 11.5 (**)} = 0.4 \text{ mm}$$

La résolution horizontale est donnée par:

$$\text{RESOLUTION HORIZONTALE} = \frac{4000 \text{ mm}}{340 \text{ points/ligne}} = 11.8 \text{ mm}$$

où 880 mm et 4000 mm représentent les dimensions de l'image projetée sur la route.

## 5.2. Véhicule de mesure

Le camion mis à la disposition de l'IMAC pour les essais d'un prototype d'appareil de mesure du profil en travers est un UNIMOG-S (photo 5).

Le bâti contenant l'appareil de mesure est monté directement sur les longerons du camion et constitue donc une masse suspendue dont il s'agit de limiter les débattements. Le changement d'assiette du dispositif (roulis et tangage) se remarque par un changement de la distance entre les franges ou par leur rotation (fig.20). Ces déviations doivent être corrigées à l'interprétation.

---

(\*) L'image du moiré ne représente que 30% de l'image totale.

(\*\*) coefficient correspondant à  $\phi_0 = 5^\circ$ .



Photo 5.

Le choix d'un véhicule optimal ne serait guère possible sans une étude détaillée de son comportement dynamique, ce qui impliquerait l'engagement de moyens disproportionnés par rapport à l'amélioration recherchée.

Les courses expérimentales effectuées sur différentes chaussées ont mis en évidence l'importance de la suspension sur la qualité du moiré observé. Cette suspension doit être assez *molle* et bien amortie pour absorber au mieux les chocs provoqués par des obstacles tels que des joints de ponts, etc.

Les vibrations de fréquence élevée engendrées par le moteur ou le groupe électrogène sont filtrées par une isolation introduite entre le dispositif de mesure et le camion.

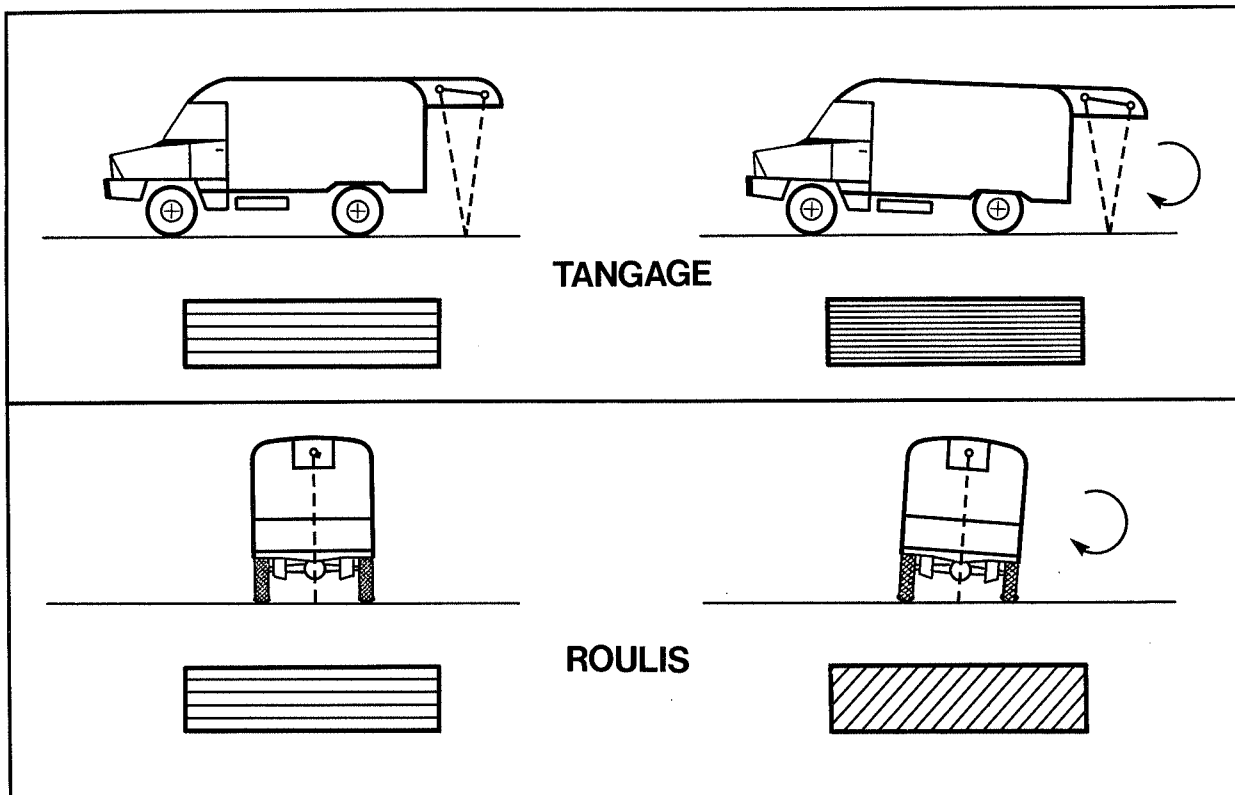


Fig.20. - Influence des mouvements de la caisse du camion sur les franges.

### 5.3. Appareils de saisie de données complémentaires

Les données utiles à l'interprétation du profil en travers sont:

- le positionnement longitudinal du véhicule sur un tronçon,
- le positionnement latéral,
- le dévers de la chaussée,
- les indications sur le revêtement.

#### 5.3.1. Positionnement longitudinal

Le positionnement longitudinal du véhicule se fait simultanément au relevé du profil par l'enregistrement d'un code représentant le nombre de tours de roue parcourus par le véhicule. La distance correspondant à un tour de roue est établie avant une campagne de mesures. Elle n'est pas constante, mais dépend de facteurs tels que la pression des pneus,

l'orientation des roues, etc. Le positionnement avec une précision de 1 mètre peut être atteint en s'aidant de l'image de la chaussée relevée. Il est possible par ce moyen de procéder à de nombreuses calibrations lors d'un relevé: les joints de ponts, par exemple, apparaissent clairement sur l'image et peuvent servir à *caler* le profil.

Un autre moyen utilisé est l'enregistrement sur la bande son de l'indication des kilomètres basée sur les panneaux placés en bordure de chaussée.

Les observations faites à ce jour montrent qu'en général le profil transversal varie de manière insignifiante sur une distance de 1 mètre qui correspond à la précision fixée dans le cahier des charges.

### 5.3.2. Positionnement latéral

Le positionnement latéral s'effectue à l'aide de la bande d'arrêt qui est présente sur l'image vidéo du moiré.

### 5.3.3. Dévers de la chaussée

A l'arrêt, le dévers de la chaussée peut être mesuré par un simple pendule. Dans un système mobile, le gyroscope devient le seul appareil de mesure suffisamment exact quelle que soit la trajectoire du véhicule. Le prix d'un appareil répondant aux exigences posées en matière de précision est tel pour l'instant qu'une limitation de la vitesse du camion lors des mesures paraît plus appropriée. Pour un véhicule circulant à 20 km/h dans un virage de rayon minimal pour les autoroutes suisses de 900 mètres, on obtient:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{5,6^2}{900} = 0.03 \text{ m/sec}^2$$

$$\Rightarrow \frac{a}{g} = \frac{0.03}{0.81} = 0.4\% < 0.5\% (*)$$

---

(\*) 0.5% est la valeur imposée par le cahier des charges.

Dans ces conditions, l'utilisation du pendule reste acceptable. Lors d'un choc, par exemple au passage d'un joint de pont, les mêmes restrictions que pour l'image du moiré s'appliquent à la mesure du dévers.

Il conviendra de surveiller l'évolution du marché en matière de gyroscope. Si les prix demeurent aussi élevés, un système de compensation en temps réel des erreurs dues aux accélérations du véhicule peut être envisagé, qui permettrait de circuler à des vitesses plus importantes.

### Calcul du dévers à partir de la mesure du pendule

Le tableau IV contient les diverses composantes intervenant dans le calcul du dévers  $i$ .

En se basant sur la convention de signe du tableau IV, on obtient (fig.21):

$$\Rightarrow i = \omega - \gamma + \sigma \quad (*)$$

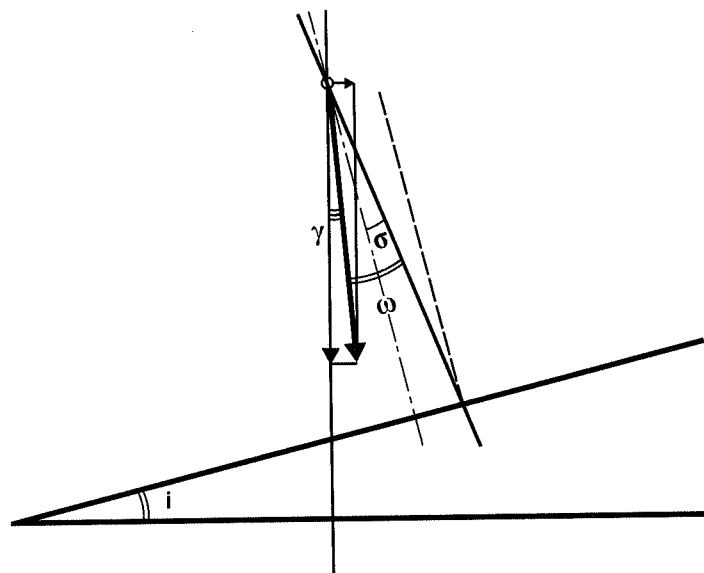


Fig.21. - Représentation graphique des divers angles entrant dans le calcul du dévers  $i$ .

---

(\*) Les valeurs  $\gamma$  et  $\sigma$  ne sont pas des valeurs exactes, mais de bonnes approximations.






|  |  |
|--|--|
| <p>DEVERS DE LA CHAUSSEE</p>    | <p>V.D.<br/>voie de dépass.<br/>V.N.<br/>voie normale<br/>B.A.<br/>bande d'arrêt</p>   |
| <p>LECTURE DU PENDULE</p>   | <p>Valeur lue<br/>sur le pendule</p>   |
| <p>ACCELERATION CENTRIFUGE</p>  <p>virage à droite      virage à gauche</p>  | <p><math>tg \gamma = \frac{a}{g} = \frac{v^2}{g \cdot R}</math></p>  |
| <p>MOUVEMENT DE LA CAISSE</p>  <p>INCLINAISON DES FRANGES</p>  | <p>avec <math>\Delta h</math> = dist.<br/>entre les plans<br/><math>\alpha</math> = inclinaison des<br/>franges<br/><math>d</math> = distance entre<br/>les franges<br/><math>\sigma = f(\alpha, d)</math></p> |

Tableau IV - Paramètres intervenant dans le calcul du dévers  $i$  à partir de la valeur indiquée par le pendule.

#### 5.3.4. Indications sur le revêtement

L'ingénieur responsable des mesures peut compléter l'enregistrement par des indications sur le revêtement tels que la date de la pose de la couche d'usure, du type de bitume, etc.

### 6. ENGAGEMENT *IN SITU* DU VEHICULE : ACQUISITION DES DONNEES

L'équipement du camion avant une campagne de relevé comprend la fixation du bâti-support du dispositif de mesure sur les longerons, la mise en place des appareils de saisie ou de visualisation, ainsi que les opérations de calibration.

Entre deux mesures ou lors des déplacements, le dispositif de mesure monté sur des rails reste à l'intérieur du véhicule. Arrivé sur le lieu des mesures, il doit être déplacé de telle sorte qu'il se trouve en porte-à-faux par rapport à l'arrière de la caisse du camion (annexe 5). Après avoir démarré le groupe électrogène, les divers appareils sont mis sous tension et le camion se positionne sur la voie à relever. Un véhicule du centre d'entretien (par exemple girafe) équipé de gyrophares et de signaux se tient à quelques dizaines de mètres à l'arrière et prévient les automobilistes de l'obstacle constitué par le camion roulant à une vitesse de 20 km/h. La police d'autoroute surveille le convoi à distance et intervient en cas de nécessité pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic. On peut rappeler ici que cette limitation de vitesse est imposée principalement par l'utilisation d'un pendule pour la mesure du dévers et par le souci de réduire l'influence des chocs transmis au dispositif suspendu.

Sur le pont du camion, le responsable des mesures veille à la bonne qualité de la saisie de l'ensemble des données.

Un collaborateur du bureau des autoroutes participe au relevé. Il assiste le chauffeur en donnant des instructions sur les tronçons à étudier. Il apporte les informations utiles sur les caractéristiques de la chaussée. Cette description complétée par des commentaires techniques, est enregistrée sur bande vidéo. Elle facilite l'interprétation de l'image à la restitution.

Pour retrouver au mieux les conditions dans lesquelles les modèles ont été étudiés en laboratoire (par exemple obscurité de l'environnement de la plage éclairée ou qualités optiques de l'état de surface des objets), il

est indispensable d'effectuer le relevé *in situ* de nuit sur chaussée sèche. Toute modification de ces conditions entraîne une dégradation du contraste de l'image du réseau projeté sur le revêtement qui peut être fatale à la méthode: un revêtement neuf brillant ou une chaussée mouillée peuvent produire une réflexion spéculaire qui éblouit la caméra de prise de vue et rend l'interprétation de l'image impossible.

Cette phase d'acquisition en continu permet de choisir après coup la représentation de profils en travers en n'importe quel point du tronçon (sous réserve de petites zones telles que celles que l'on rencontre au passage de joints de ponts). La largeur du profil correspond à celle d'une voie d'autoroute et le nombre de points qui le constitue est donné par la résolution du système d'enregistrement (voir par exemple 5.1.3).

## 7. TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement des données consiste à extraire, à partir de la topographie fine de la chaussée visualisée et enregistrée en continu sur une largeur correspondant à une voie d'autoroute (photo 6), les informations nécessaires à la représentation et à la caractérisation du profil en travers en un point donné de la route.

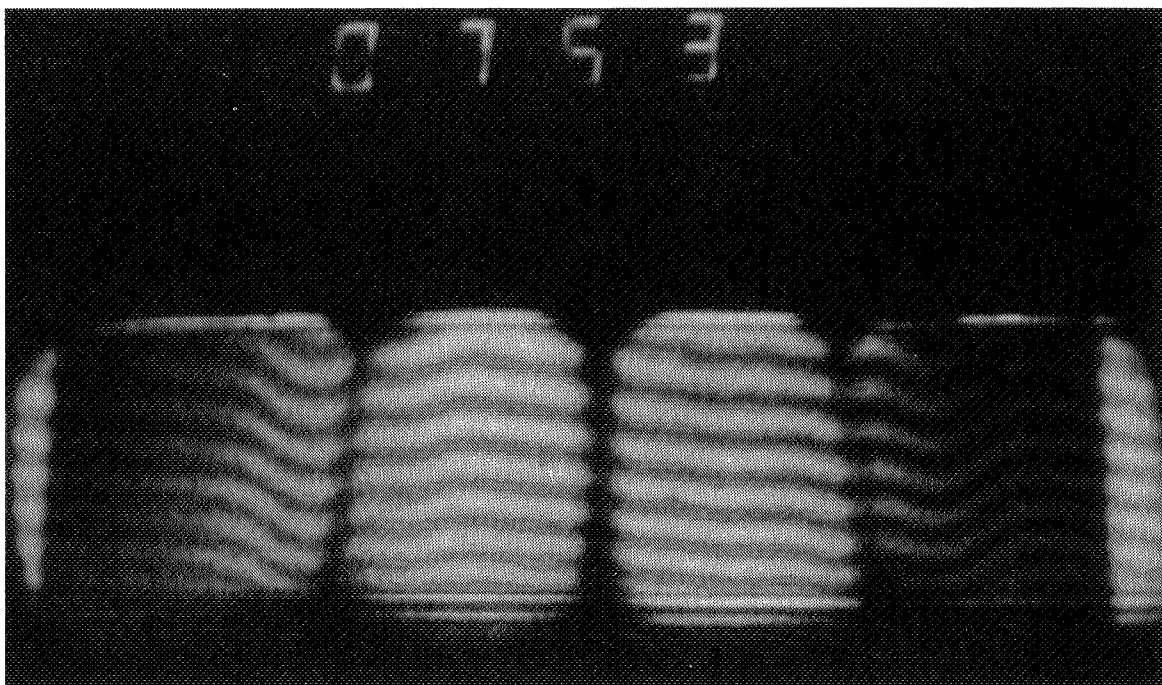


Photo 6.

En fait, l'ingénieur responsable de l'entretien peut choisir, selon les circonstances, entre une interprétation qualitative, moins précise mais immédiate (fig.22) et une interprétation quantitative objectivée par une restitution graphique précise à partir de l'image électronique (fig.23).

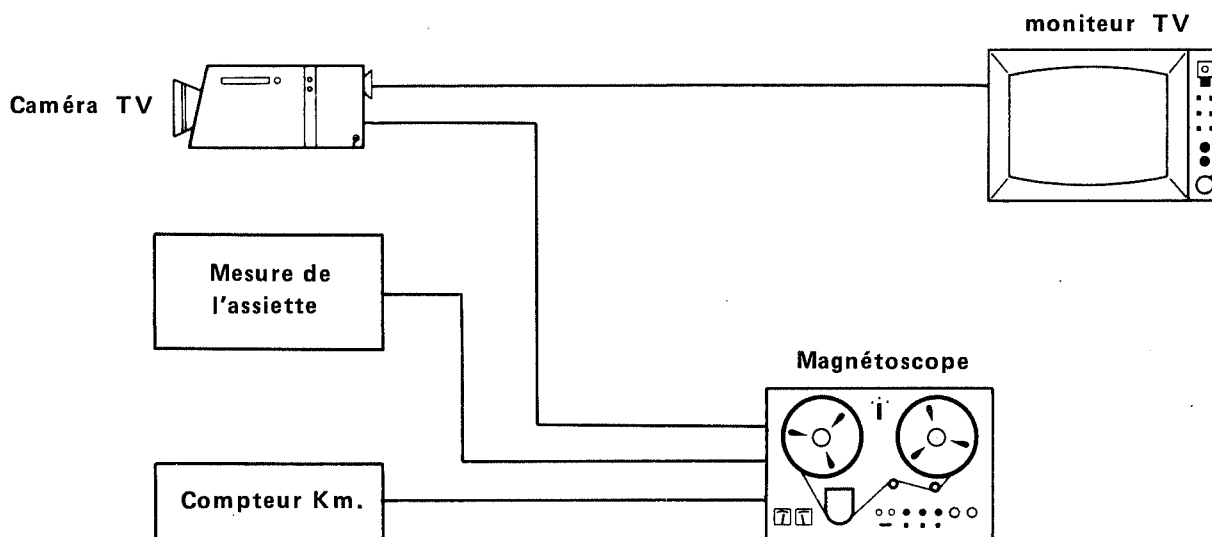


Fig.22. - Exploitation qualitative de l'image.

### 7.1. Interprétation qualitative

L'interprétation qualitative simplifie considérablement la procédure d'évaluation de la qualité du profil en travers d'une chaussée. En effet, la localisation arbitraire ou statistique des profils le long d'un tronçon à analyser peut être remplacée avantageusement par une sélection de profils faite selon des critères bien définies ou résultant d'observations spontanées significatives. En d'autres termes, la surveillance en continu du tronçon sur un moniteur TV, pendant ou après le relevé, permet de définir le nombre et la localisation des profils par les particularités mêmes de la chaussée.

La figure 24 reprend les principales composantes de l'image. En haut, on distingue l'affichage du nombre d'impulsions (2), proportionnel à la distance parcourue, qui permet de connaître la position du véhicule. La mesure, qui procède par comptage du nombre de tours de roue, est entachée d'une erreur cumulative qu'il convient d'éliminer en effectuant plusieurs points fixes (en moyenne un tous les cinq kilomètres). Ces repères peuvent être pris sur le marquage de la chaussée ou, s'il existe des

ouvrages, aux joints de ponts. Dans ce dernier cas, il n'est pas nécessaire d'arrêter le camion pour le calage, car les joints apparaissent distinctement sur l'image.

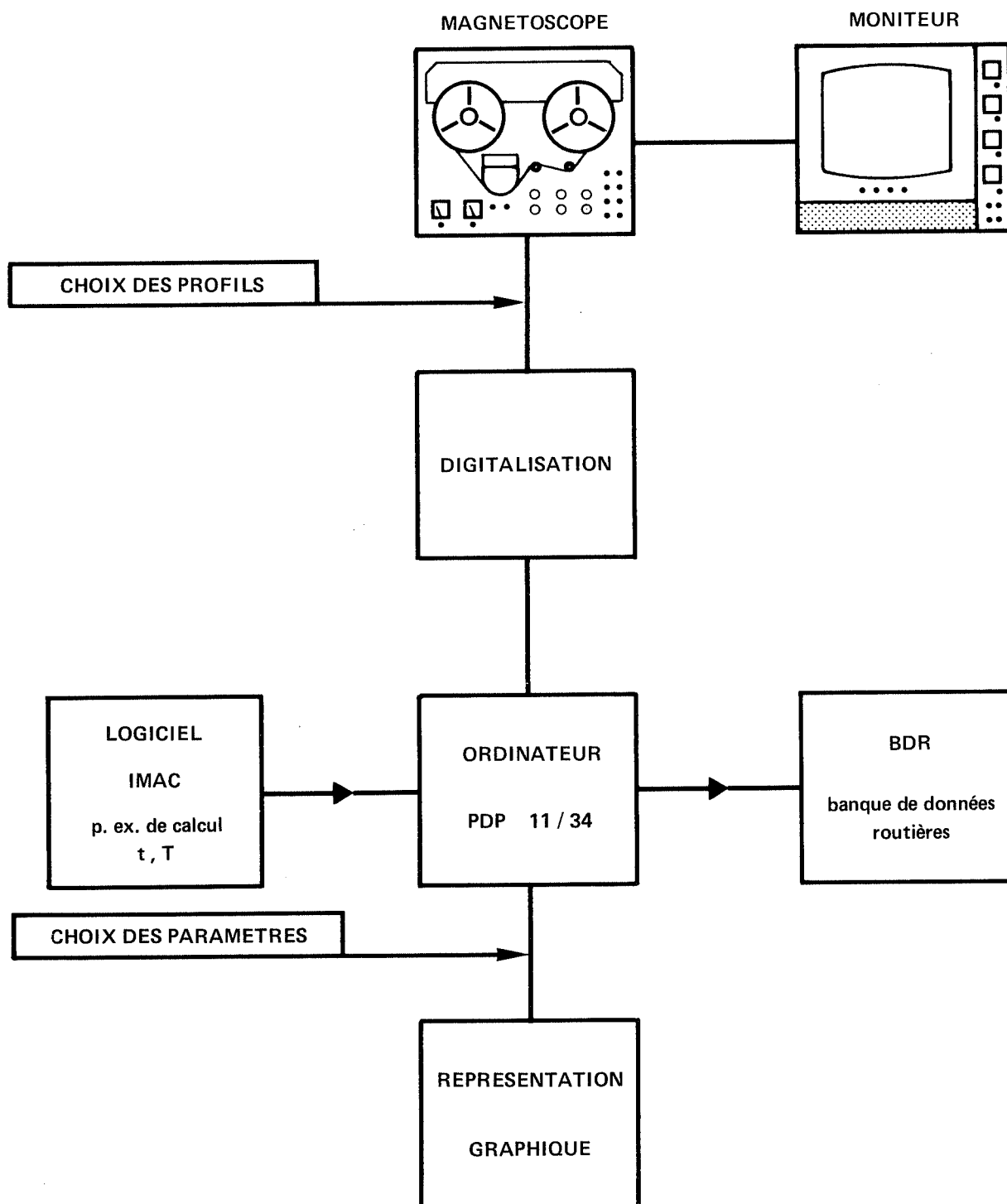
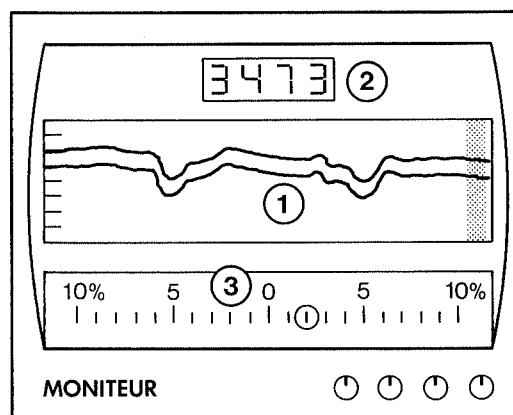


Fig.23. - Exploitation quantitative de l'image.

Fig.24. - Informations contenues dans l'image.



- ① RELEVÉ DU PROFIL
- ② KILOMETRAGE
- ③ DEVERS

A l'aide de ces points fixes, le profil peut être positionné avec une précision de  $\pm 1$  mètre. C'est ainsi que lors du relevé d'une chaussée comportant des points de carottage visibles sur l'image, ceux-ci ont pu être restitués sur l'écran en se basant sur le nombre d'impulsions.

Au centre, l'image de moiré (1) comporte six à huit lignes d'interférence. En l'absence de défauts locaux, la forme du revêtement est une surface réglée et ces lignes sont parallèles, équidistantes et orientées horizontalement. Dans ce cas et lorsqu'un traitement systématique et complet n'est pas souhaitable, l'ingénieur peut être renseigné rapidement sur la forme de l'ornière, la distance sur laquelle elle s'étend et il peut même, en superposant à la figure de moiré une grille de comparaison, évaluer avec une précision satisfaisante la profondeur d'ornière.

Sur le bas de l'image, on peut voir une tache lumineuse qui se déplace le long d'une échelle (3) et indique le dévers au profil considéré. Il s'agit d'un *spot laser* provenant d'un faisceau réfléchi sur des miroirs intégrés à un pendule; la stabilité de celui-ci est appréciée d'après l'intensité de ses mouvements avant et après le profil étudié. Lorsque le profil longitudinal est tourmenté ou lors de chocs, il faut renoncer à toute lecture; mais l'expérience acquise montre qu'avec le véhicule roulant à une vitesse de 20 km/h, la précision de la mesure de  $\pm 0.5\%$  exigée par le cahier des charges peut être satisfaite.

## 7.2. Interprétation quantitative

La gestion efficace d'un réseau routier commence par une observation systématique continue dans l'espace et à intervalles réguliers de certains paramètres caractéristiques de la chaussée. Par exemple, l'évolution de la profondeur d'eau et de la profondeur d'ornière enregistrée périodiquement constitue une aide précieuse à la décision ou à la planification pour ce qui concerne le renouvellement d'une couche de revêtement. Le suivi de cette évolution exige une grande précision de la mesure que seule peut satisfaire une interprétation quantitative de l'image. Le traitement de l'information comprend trois étapes.

### 7.2.1. Introduction des coordonnées des points d'une frange à l'ordinateur

Dans un premier temps, l'introduction des coordonnées des points significatifs s'est faite à l'aide d'un coordinatographe: l'image du champ de franges de l'endroit étudié était projetée sur un écran de 1 m × 1 m et par l'intermédiaire d'un curseur, la position de chaque point était codée et enregistrée sur bande perforée, pour être ensuite *lue* par l'ordinateur.

Ces dernières années, les nombreuses applications potentielles du traitement électronique de l'image ont eu pour conséquence un développement spectaculaire des digitaliseurs (ou numériseurs). L'acquisition récente d'un appareil performant par l'IMAC a permis de simplifier notablement la procédure de l'introduction des coordonnées: l'enregistreur vidéo peut être relié à l'ordinateur par l'intermédiaire du digitaliseur qui convertit en temps réel l'image analogique enregistrée sur bande en une image 512 × 512 points auxquels sont attribués des niveaux de gris compris entre 0 et 255 (fig.23). L'utilisateur peut effectuer facilement et rapidement de nombreuses opérations sur l'image, telles que l'agrandissement (zoom), la translation, l'augmentation de contraste... Ces facilités nouvelles débouchent sur une procédure de traitement de l'information semi-automatique qui réduit le temps nécessaire à la représentation d'un profil choisi de 30' à environ 5'.

Mais l'intérêt principal de l'engagement d'un tel appareil est la possibilité à plus ou moins long terme de traiter l'image de manière entièrement automatique, depuis la restitution de la bande vidéo jusqu'à la sortie graphique de la forme d'un profil.

Les logiciels disponibles en ce moment ne sont malheureusement pas encore suffisamment performants pour détecter et poursuivre les franges

quelle que soit la qualité du relevé sans intervention de l'opérateur. Lorsque les franges de moiré sont bien définies, le logiciel mis au point à l'IMAC permet déjà le traitement automatique de l'image: l'annexe détaille les diverses phases de ce traitement pour un profil choisi.

En plus de la forme et de l'orientation de la frange, les données indispensables au traitement automatique sont la distance entre les franges, le code servant de base au calcul de la position le long du tronçon et le dévers. Ces informations sont actuellement introduites par l'opérateur interactivement. La photo 7 montre le développement entrepris pour automatiser l'entrée des données. L'information relevée par chaque capteur est mise sous forme digitale pour faciliter son transfert sur ordinateur.

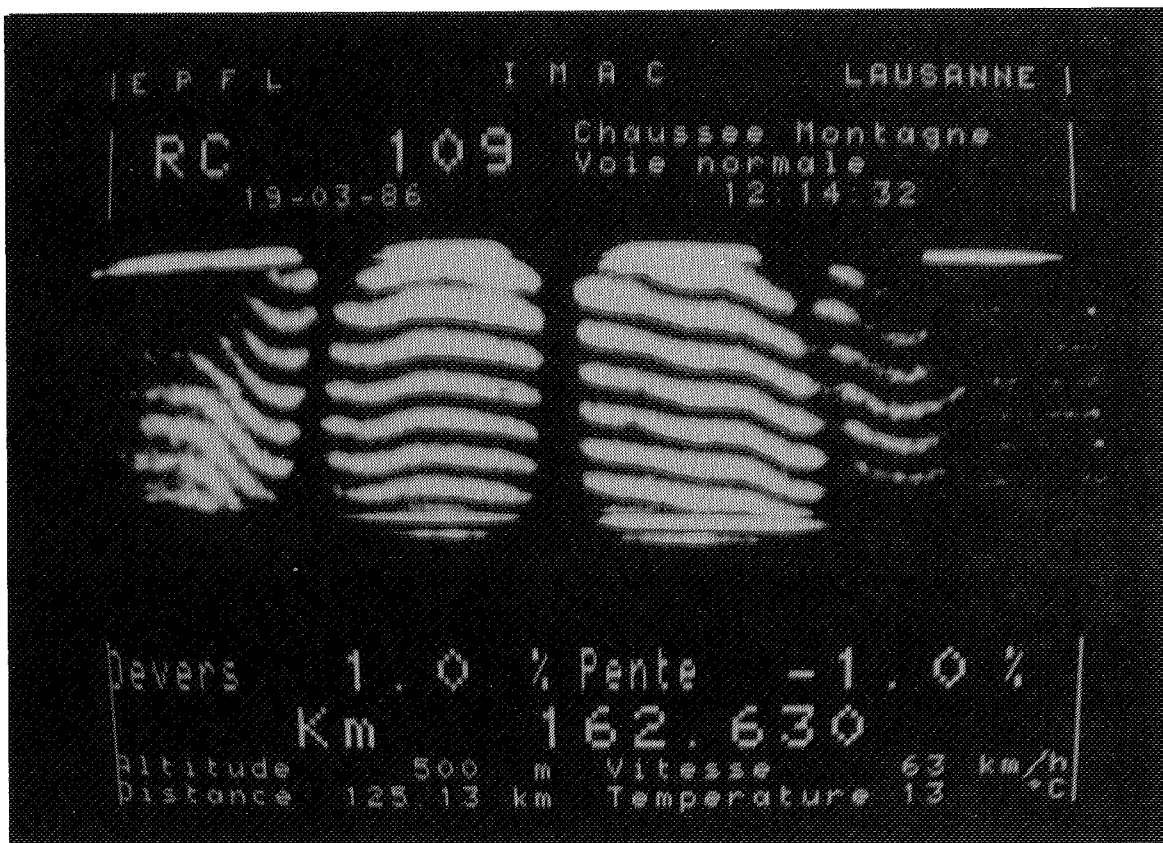


Photo 7.

### 7.2.2. Transformation des coordonnées des points d'une frange dans un système de référence fixe

Le chapitre 3.3 décrit comment l'altitude et la position d'un point peuvent être ramenées dans un système de référence lié à la route

à partir des coordonnées de l'image de ce point. Un programme *ad hoc* effectue les transformations pour l'ensemble des points significatifs de l'image. Il relie ensuite les points d'une même frange entre eux et procède à un lissage de la ligne résultante.

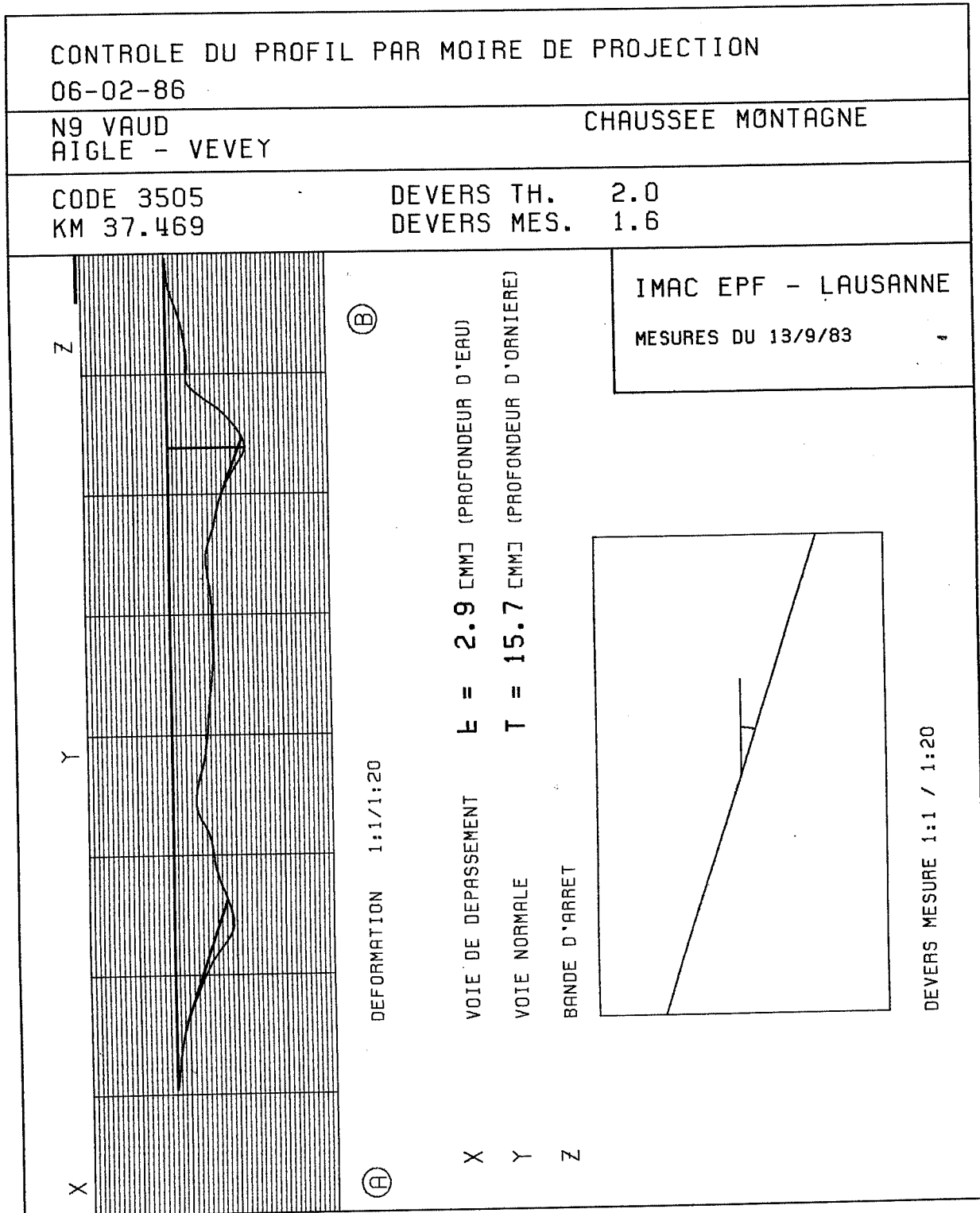


Figure 25.

### 7.2.3. Calcul de la profondeur d'ornière et de la profondeur d'eau. Représentation graphique du profil

Après projection dans un plan vertical de la courbe issue du lissage, le programme trace une droite entre les deux points les plus élevés et calcule la profondeur d'ornière  $T$ . Il est à mentionner que la valeur exacte n'est obtenue que si les deux points visibles sur l'écran sont bien les deux points les plus élevés du profil. Pour le calcul de la profondeur d'eau maximale  $t$ , l'opérateur doit introduire la valeur du dévers au lieu considéré.

Ces résultats, ainsi que les indications d'identification du profil, sont regroupés en un fichier de données qui peut servir aussi bien de base à la représentation graphique qu'être une source d'informations pour une banque de données.

L'interprétation quantitative est facilitée par la reproduction du tracé du profil sur une page standard contenant toutes les données relatives à ce profil (fig.25): l'orientation de celui-ci est choisie de telle sorte qu'il s'inscrive toujours dans un même cartouche. La fenêtre, située en-dessous, donne l'orientation de l'horizontale et permet de tourner le profil dans sa position réelle.

## 8. ETUDE EXPERIMENTALE *IN SITU*

C'est depuis 1983 que des tronçons sur les réseaux routiers des cantons de Vaud, Fribourg, Tessin et Bâle ont été mesurés à l'aide du dispositif décrit auparavant, à satisfaction des utilisateurs.

L'ensemble des tronçons mesurés depuis la mise en service du véhicule de mesure s'élève à environ 1000 km, ce qui représente environ 250 km par année. Compte tenu que les campagnes de mesure se font pratiquement toutes dans la période de septembre à novembre, ce chiffre de 250 km par année paraît prometteur pour les années à venir.

De plus, à l'aide de ce dispositif, l'ingénieur responsable de l'entretien d'un réseau routier dispose maintenant d'un appareillage performant ayant fourni ses preuves. L'atout majeur de ce principe est sans doute l'auscultation continue de la topographie fine de la chaussée en temps réel ou différé (aucune interruption du trafic routier lors d'une campagne de mesure *in situ*).

## 9. CONCLUSIONS

Au terme de cette étude, nous avons pu apporter au praticien un outil opérationnel et fiable de relevé en continu de l'orniérage des routes.

Cet appareillage est, à notre connaissance, le seul dispositif existant à l'heure actuelle qui permette le relevé continu de la topographie fine de la chaussée.

Au cours d'une période probatoire, 1000 km de voies d'autoroutes ont été mesurés à l'aide du dispositif proposé.

Comme toutes les méthodes optiques de contrôle non destructif, celle-ci ne nécessite pas de contact direct avec la surface analysée; elle est en outre exempte d'inertie et permet le contrôle de l'image du relevé en temps réel.

Lors de la mesure, l'exploitation systématique de la plage vidéo permet en outre de stocker une série de paramètres présentant un intérêt pour la gestion de l'entretien: dévers observé, caractéristiques du tracé, connections de l'observateur, etc.

Grâce à un logiciel d'interprétation d'une grande souplesse, l'utilisateur peut obtenir à son gré les grandeurs jugées significatives pour la gestion du réseau routier: tracé du profil en travers, détermination automatique de la profondeur d'eau (t) et de la profondeur d'ornière (T), courbure de l'ornière, etc.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à l'Office fédéral des routes et à l'Union suisse des professionnels de la route pour la part qu'ils ont prise dans le soutien de ce travail.

## 10. BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. Pflug: "Application de la technique des moirés à l'étude de la surface d'un revêtement routier". EPF-Lausanne. Mandat de recherche 47/77 VSS. Décembre 1978.
- [2] OCDE Report: "Entretien des routes en rase campagne". Rapport du groupe C6. Août 1973.
- [3] Planéité - Contrôle de la géométrie. Norme VSS 640520A. Mars 1977.
- [4] Planéité - Exigences. Norme VSS 640.521a. Mars 1977.
- [5] J.-P. Collet, J. Marasco, L. Pflug: "Le moiré d'ombre: une méthode expérimentale et ses possibilités". Bulletin technique de la Suisse romande, no. 9, 25 avril 1974.
- [6] Hiroshi Takasaki: "Moiré Topography". Proc. Ico. Conf. Opt. Methods in Sci. and Ind. Meas. Tokyo 1974.

**ANNEXE 1 - Calcul de l'altitude  $Z_M'$  du point M de l'objet  
(fig.4)**

- $n_1$  : nombre de lignes du 1er réseau contenues dans le segment om  
 $n_2$  : nombre de lignes du 2ème réseau contenues dans le segment om  
 $p$  : pas du réseau sur  $X'$   
 $N$  : ordre de la frange.

L'équation générale d'obtention de la frange de moiré d'ordre  $N$  s'écrit:

$$n_2 p - n_1 p = N p \quad (1)$$

ou au niveau du plan  $X'Y'$

$$X'(T) - X'(S) = N p \quad (2)$$

L'intersection entre la droite  $d_3$  passant par  $M'$  et de la droite  $z' = d_i$  donne les coordonnées du point  $T$

$$d_3 : z' = \frac{u}{v} x'$$

avec

$$u = (\delta_o + Z_M') \cos \beta - \left[ \frac{x''}{\delta_i} (\delta_o + Z_M') - b \right] \sin \beta$$

$$v = \left[ \frac{x''}{\delta_i} (\delta_o + Z_M') - b \right] \cos \beta + (\delta_o + Z_M') \sin \beta$$

$$d_3 \cap z' = d_i \quad \Rightarrow \quad X'(T) = d_i \frac{v}{u}$$

L'intersection entre la droite  $d$  passant par  $M$  et la droite  $z' = d$  donne les coordonnées du point  $S$

$$d_4 : z' = \frac{r}{t} x'$$

avec

$$r = \delta_o \cos \beta - \left( x'' \frac{\delta_o}{\delta_i} - b \right) \sin \beta$$

$$t = x'' \frac{\delta_o}{\delta_i} \cos \beta$$

$$d_4 \cap z' = d_i \quad \Rightarrow \quad X'(S) = d_i \frac{t}{r}$$

$$X'(T) - X'(S) = Np = d_i \left( \frac{v}{u} - \frac{t}{r} \right)$$

Après avoir procédé aux transformations nécessaires, on obtient

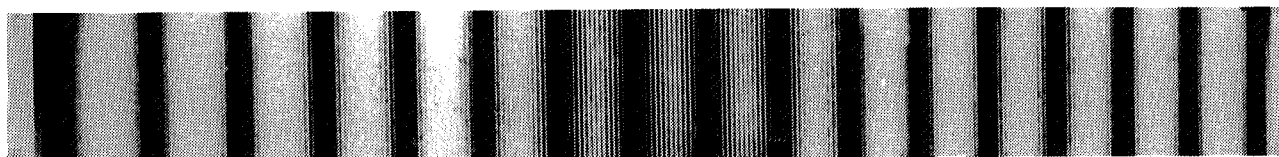
$$Z_M' = \frac{Nps^2}{b \cdot d_i - Nps \left( \frac{\delta_0}{d_i} - \frac{x'' \cdot b}{\delta_i \cdot d_i} \right)} \quad (3)$$

avec

$$s = d_i - \frac{x'' \cdot b \cdot \delta_0}{\delta_i \cdot d_i}$$

## ANNEXE 2 - Intersections avec un plan incliné à 10 degrés

$\Delta 0 = 2565\text{mm}$      $d_i = 2730\text{mm}$      $b = 933\text{mm}$      $p = 2.083\text{mm}$

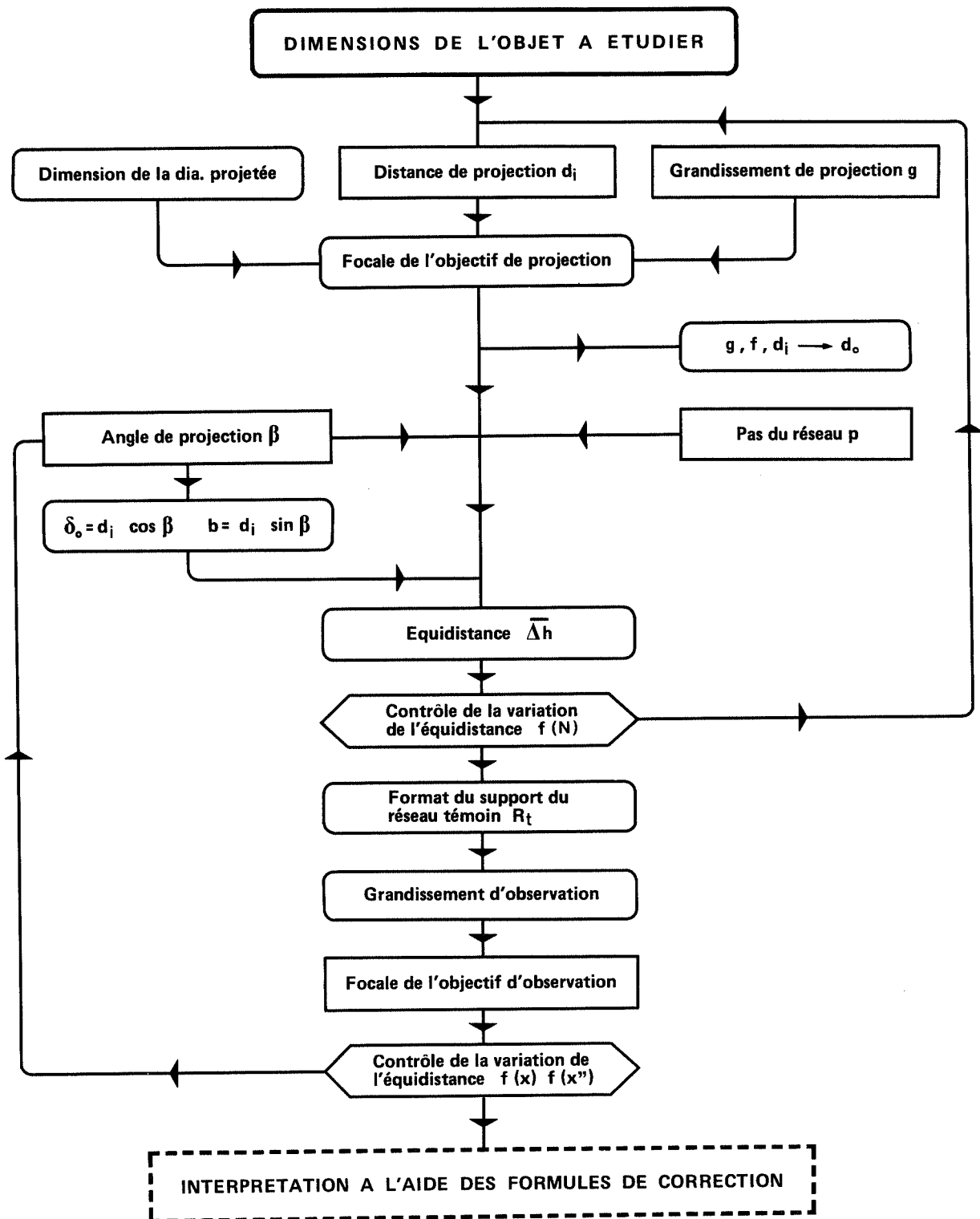


⊖

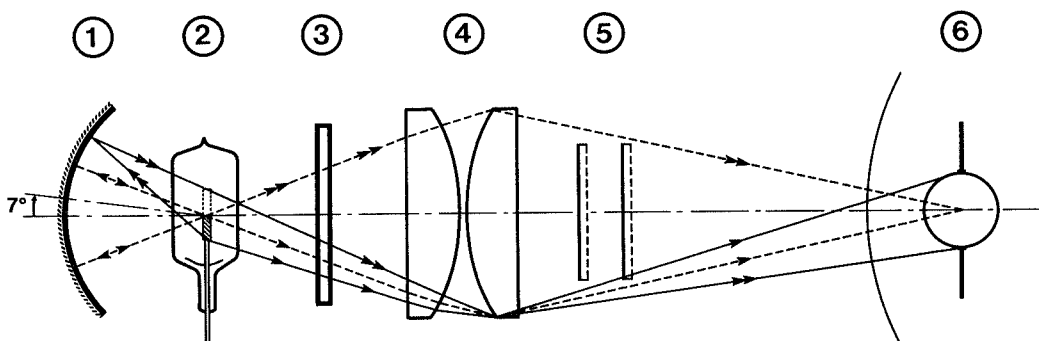
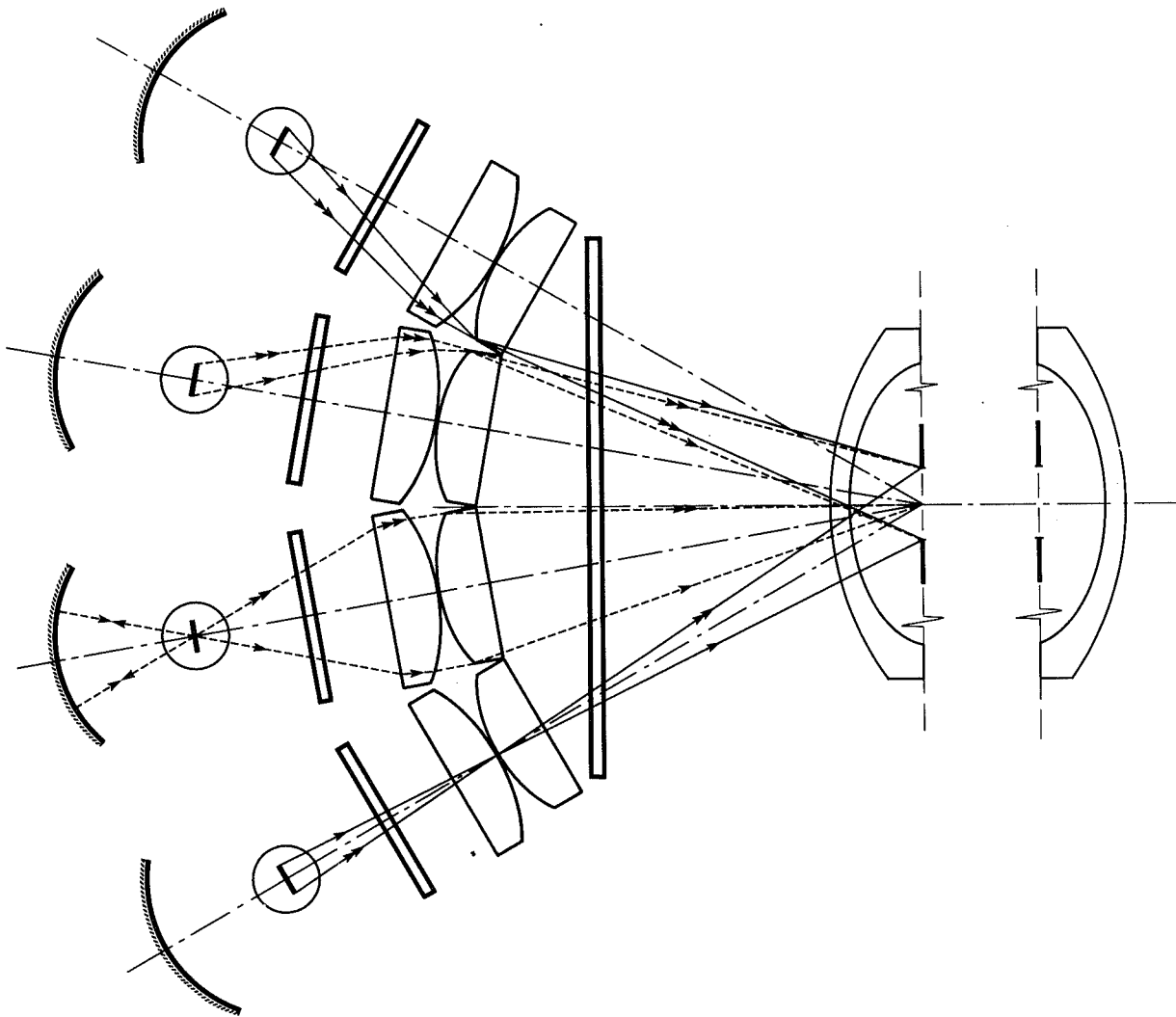
⊕

| N     | x''<br>(Photo) | x''<br>(Plaque) | x       | h      | Ex     | Eh     | Phi   |
|-------|----------------|-----------------|---------|--------|--------|--------|-------|
| -8.00 | 90.00          | 11.09           | 255.19  | -44.94 | -0.17% | -0.05% | 9.99  |
| -7.00 | 79.00          | 9.73            | 224.49  | -39.72 | 0.28%  | -0.07% | 10.03 |
| -6.00 | 68.00          | 8.38            | 193.66  | -34.39 | 0.64%  | -0.07% | 10.07 |
| -5.00 | 57.00          | 7.02            | 162.69  | -28.95 | 0.84%  | -0.06% | 10.09 |
| -4.00 | 46.00          | 5.67            | 131.59  | -23.39 | 0.76%  | -0.04% | 10.08 |
| -3.00 | 35.00          | 4.31            | 100.34  | -17.72 | 0.14%  | -0.01% | 10.01 |
| -2.00 | 23.00          | 2.83            | 66.09   | -11.94 | 2.37%  | -0.05% | 10.24 |
| -1.00 | 12.00          | 1.48            | 34.56   | -6.04  | -1.03% | 0.01%  | 9.90  |
| 0.00  | 0.00           | 0.00            | 0.00    | 0.00   | 0.00%  | 0.00%  | 10.00 |
| 1.00  | -12.00         | -1.48           | -34.71  | 6.16   | 0.68%  | 0.00%  | 10.07 |
| 2.00  | -24.00         | -2.96           | -69.58  | 12.46  | 1.54%  | 0.02%  | 10.15 |
| 3.00  | -37.00         | -4.56           | -107.51 | 18.90  | -0.30% | -0.02% | 9.97  |
| 4.00  | -49.00         | -6.04           | -142.69 | 25.48  | 1.26%  | 0.02%  | 10.12 |
| 5.00  | -62.50         | -7.70           | -182.42 | 32.23  | 0.16%  | -0.03% | 10.02 |
| 6.00  | -76.00         | -9.36           | -222.32 | 38.13  | -0.23% | -0.06% | 9.98  |
| 7.00  | -90.00         | -11.09          | -263.88 | 46.22  | -0.79% | -0.12% | 9.93  |
| 8.00  | -105.00        | -12.93          | -308.55 | 53.51  | -1.91% | -0.23% | 9.84  |

ANNEXE 3 - Procédure de choix des valeurs attribuées aux paramètres intervenant dans la mesure par moiré de projection



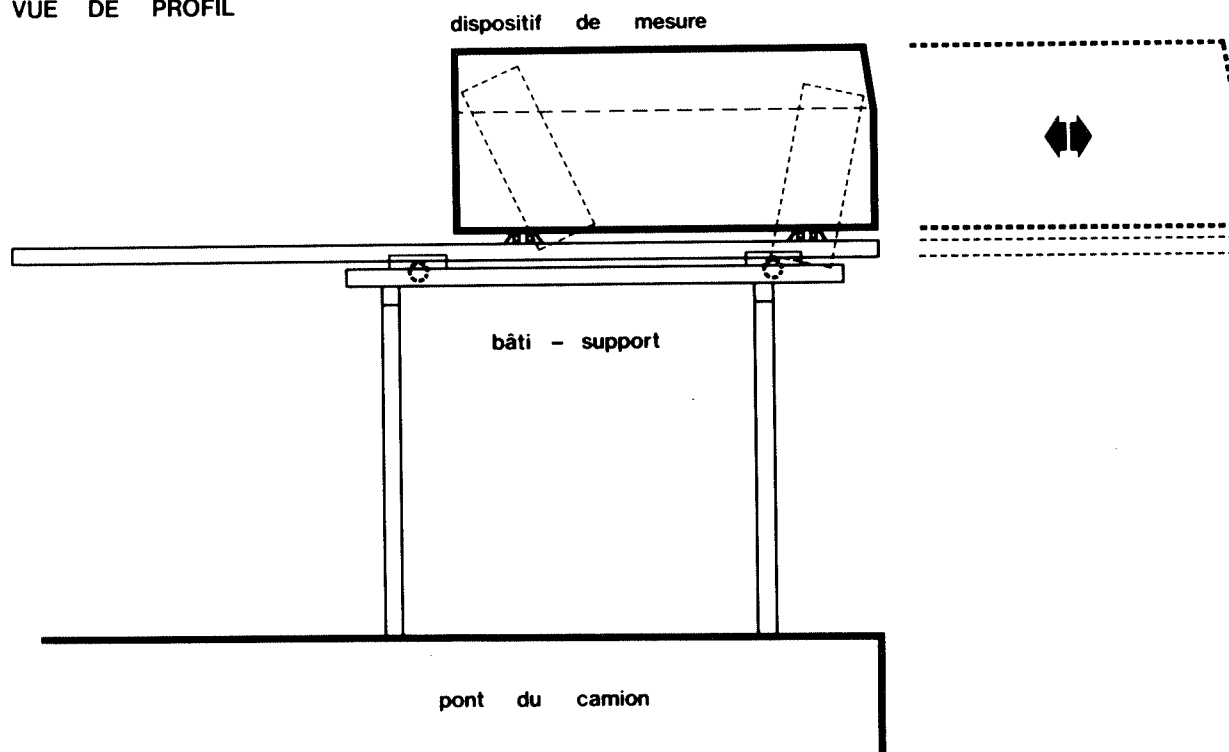
## ANNEXE 4 - Projecteur constitué par quatre lampes placées radialement



- |                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| 1) miroir            | 4) condenseurs           |
| 2) lampe             | 5) plaque photographique |
| 3) filtre de chaleur | 6) objectif              |

## ANNEXE 5 - Dispositif de mesure

VUE DE PROFIL



VUE DE FACE

