

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Toulouse, le 15 mars 1983
CT/GEPAN – 00018

NOTE TECHNIQUE N° 18

SYSTEME D'ACQUISITION ET D'ANALYSE DE SPECTRES PHOTOGRAPHIQUES

LE POINT SUR L'UTILISATION DES RESEAUX DE DIFFRACTION



Groupe d'Etude des Phénomènes Aérospatiaux Non-Identifiés

Français LOUANGE
MARS 1983

ISSN : 0750-6694

SOMMAIRE

1 - EXPOSE DU PROBLEME

2 - PRINCIPE DE LA SOLUTION

3 - MISE EN PLACE DES MOYENS

4 - MÉTHODE D'EXTRACTION : ANALYSE DE LA PARTIE OPTIQUE

- 4.1. - DOMAINE SPECTRAL CONCERNE
- 4.2. - FTM DE LA CHAÎNE OPTIQUE
- 4.3. - DÉVELOPPEMENT DES CLICHES
- 4.4. - NUMÉRISATION DES CLICHES

5 - MÉTHODE D'EXTRACTION : ANALYSE DE LA PARTIE INFORMATIQUE

- 5.1. - DÉSIGNATION DE LA SOURCE A ÉTUDIER
- 5.2. - DÉSIGNATION DU SPECTROGRAMME
- 5.3. - PROBLÈMES LIÉS A LA SATURATION
- 5.4. - SUPERPOSITION DE L'IMAGE ET DU SPECTROGRAMME
- 5.5. - CALIBRATION EN LONGUEURS D'ONDE
- 5.6. - CALIBRATION EN DENSITÉ

6 - MISE EN OEUVRE DU PROGRAMME D'EXTRACTION

- 6.1. - ORGANISATION GÉNÉRALE
- 6.2. - ÉTAPES DU TRAITEMENT

7 - PROCÉDURE STANDARD DE TRAITEMENT DES CLICHES

- 7.1. - CLICHES DE CALIBRATION
- 7.2. - DÉVELOPPEMENT DU FILM
- 7.3. - NUMÉRISATION
- 7.4. - EXTRACTION DU SPECTRE
- 7.5. - TRAITEMENT SPÉCIFIQUE (OPTIONNEL)

8 - CATALOGUE DE SPECTRES DE SOURCES CONNUES

9 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- 9.1. - LE SYSTÈME INFORMATIQUE
- 9.2. - LE RÉSEAU DE DIFFRACTION
- 9.3. - ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES
- 9.4. - COMMERCIALISATION

1 - EXPOSE DU PROBLEME -

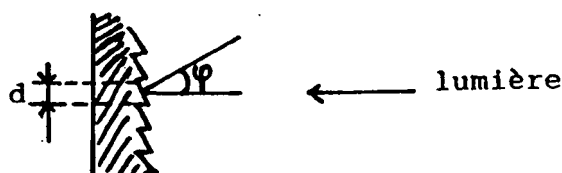
L'étude des PAN (Phénomènes Aérospatiaux Non-identifiés) s'appuie essentiellement sur les observations empiriques rapportées par des témoins fortuits. Pour s'affranchir des "distorsions" plus ou moins importantes liées à la psychologie de la perception, à la subjectivité et à la culture des témoins, il faut chercher à recueillir des données parfaitement objectives à l'aide d'instruments de mesure. Depuis longtemps, et en particulier dans le grand public, la photographie est considérée comme un moyen idéal, apportant en outre la meilleure preuve possible de l'existence réelle des phénomènes observés (l'expérience montre que c'est en fait loin d'être le cas, car un bon spécialiste peut fabriquer des clichés truqués résistant aux analyses). Dans la réalité, les analyses des photos présumées de PAN mènent souvent, au prix de travaux complexes et coûteux, à des explications définitives impliquant divers effets parasites (reflets dans l'optique, dégradation de la pellicule...) ou des supercheries. La plupart des clichés qui résistent à l'analyse montrent des sources lumineuses photographiées de nuit, et ne sont donc porteurs que d'une très faible quantité d'information (tache blanche sur fond noir).

Depuis longtemps les chercheurs souhaiteraient disposer d'appareils permettant la décomposition spectrale de la lumière émise ou induite par les phénomènes observés, afin de pouvoir les identifier ou les caractériser. Compte tenu des statistiques disponibles sur les observations rapportées de PAN, il ne serait cependant pas justifié d'implanter sur un site unique, ni même en plusieurs endroits, des spectrographes coûteux qu'il faudrait entretenir en attendant que se manifeste éventuellement un PAN. En revanche, le type de solution adopté par le GEPAN est beaucoup plus souple, puisqu'il repose sur un dispositif simple et bon marché qui peut être adapté à n'importe quel appareil photographique du commerce, et dont on peut espérer obtenir des renseignements exploitables sur la composition de la lumière observée.

2 - PRINCIPE DE LA SOLUTION -

La solution adoptée consiste en un réseau de diffraction fonctionnant en transmission dans toute la bande spectrale du visible, monté sur une bague filetée qui permet de le fixer sur l'objectif d'un appareil photo comme n'importe quel filtre.

Le réseau lui-même se présente comme un support transparent dont une face comporte une série de gravures parallèles équidistantes avec un profil en forme de dents de scie :



La lumière incidente est en partie transmise directement par le réseau (ordre 0), tandis que l'énergie restante est diffractée. Cette diffraction a lieu perpendiculairement à la direction des gravures, et la loi de dispersion en fonction de la longueur d'onde est théoriquement linéaire. De part et d'autre de l'ordre 0, on trouve l'image de tout le spectre visible, sur plusieurs ordres successifs + 1, + 2, ... d'un côté et - 1, - 2... de l'autre. La géométrie de l'ensemble (densité de traits $1/d$ et angle de blaze φ) détermine la forme des réponses du réseau aux différentes longueurs d'onde. Des explications plus détaillées sur les calculs liés aux réseaux de diffraction, ainsi que sur les effets secondaires dus aux imperfections de fabrication, seront trouvées dans les ouvrages d'optique classique.

Les réseaux du GEPAN, dont le développement et la mise en oeuvre seront décrits dans les paragraphes suivants, ont les caractéristiques suivantes :

- Matière : résine de makrolon de 0,3 mm d'épaisseur, pressée à 100 kg/cm².
- Format : carré de 23 mm de côté, sur un disque du diamètre d'un filtre d'appareil photographique.
- Transmission : 85 % dans tout le spectre visible.
- Densité de traits : 300 traits/mm.
- Angle de blaze : 17° 27' , avec maximum d'efficacité à 6100 Å.

Le fait de monter un tel réseau devant l'objectif d'un appareil photographique permet d'obtenir des clichés sur lesquels apparaissent en superposition le paysage et les spectrogrammes des sources lumineuses suffisamment intenses. Un traitement adéquat de l'information contenue dans les négatifs permet donc l'extraction sur un même cliché des spectres émis par plusieurs sources lumineuses distinctes présentes dans le champ de l'objectif.

3 - MISE EN PLACE DES MOYENS -

Le problème pratique qu'il fallait résoudre consistait à fabriquer en série des réseaux de bonne qualité, adaptables à tout appareil photo du commerce, et d'un prix abordable (ordre de grandeur : 100 F). Dès 1976, Monsieur POHER se mettait en rapport avec la Société JOBIN-YVON pour mettre au point une solution, et en 1979, le GEPAN enregistrait une première commande importante pour la Gendarmerie Nationale, le réseau proposé ayant satisfait les conditions requises en qualité optique.

Le fait que ce réseau n'ait pas encore été commercialisé chez les détaillants photographiques résulte d'une simple question de structure industrielle : la Société qui fabrique les réseaux n'est pas intéressée par leur montage sur les multiples formats de bagues et de filetages correspondant aux objectifs du commerce ; ce travail n'est pas dans sa vocation, et il faut une commande d'au moins 500 pièces à la fois pour couvrir les frais de fabrication. C'est pourquoi seule la Gendarmerie Nationale, qui équipe toutes ses brigades avec le même type d'appareil photo, a fait l'acquisition de plusieurs milliers de réseaux JOBIN-YVON.

Aujourd'hui, la plupart des Brigades de Gendarmerie disposent donc d'un réseau adaptable à leur appareil standard et ont des instructions pour l'utiliser au cas où un PAN leur serait signalé.

En ce qui concerne le traitement des clichés, une méthode d'extraction des spectres a été développée sous contrat à partir de 1981 dans un laboratoire de traitement d'images. La Direction de la Gendarmerie Nationale a mis à la disposition de l'auteur de ce rapport un appareil standard neuf muni de son réseau. Il s'agit d'un :

- MINOLTA HI-MATIC 24 x 36, sans visée Reflex, avec un objectif ROKKOR 38mm, une ouverture à f 1/2,7 et une pose automatique d'une durée maximale de 4 secondes.

La pellicule standard utilisée avec cet appareil par les gendarmes est :

- ILFORD FP4, noir et blanc, de rapidité 125 ASA.

Les matériels mis en jeu pour la mise au point et l'application de la méthode d'extraction sont :

- Une configuration informatique de traitement d'images essentiellement constituée d'un minicalcateur MITRA 15 et d'une console TRIM.
- Un analyseur/restituteur de films (OPTRONICS).
- Un banc optique de mesures de FTM (ACOFAM).
- Un laboratoire photographique.

La définition et la justification de la méthode d'extraction font l'objet des chapitres suivants. Ses limitations et les perspectives d'amélioration seront présentées à la fin, à titre de conclusion.

4 - MÉTHODE D'EXTRACTION : ANALYSE DE LA PARTIE OPTIQUE -

4.1. - DOMAINE SPECTRAL CONCERNE -

La méthode s'applique a priori au spectre visible, qui correspond à l'information présente sur les clichés photographiques. L'examen des propriétés optiques des composants de l'ensemble de prise de vues fait apparaître les bornes suivantes :

- Le support du réseau (plaque de Makrolon de 3mm d'épaisseur) transmet à 85 % dans tout le domaine visible et jusque dans l'infrarouge (16 000 Å), mais absorbe totalement les ultraviolets (voir l'annexe 1).
Ce composant détermine la limite inférieure du spectre que l'on peut analyser : environ 4000 Å.
- Le film ILFORD FP4, au contraire, est sensible aux longueurs d'onde inférieures, mais fixe la borne supérieure aux environs de 6300 Å (voir sa sensibilité spectrale en annexe 2, § 10).

Le domaine d'application de la procédure d'analyse spectrale couvre donc les longueurs d'onde comprises entre 4000 Å et 6300 Å, lorsqu'elle est utilisée pour des clichés réalisés avec les moyens standard de la Gendarmerie Nationale.

4.2. - FTM DE LA CHAÎNE OPTIQUE -

Avant de pouvoir extraire des informations quantitatives d'images digitalisées, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de la chaîne optique mise en jeu. En particulier, le choix des paramètres de numérisation des clichés (pas d'échantillonnage, taille de la fenêtre) doit tenir compte de la résolution du système, ou plus généralement de sa réponse impulsionnelle, liée par transformation de Fourier à sa FTM (Fonction de Transfert de Modulation).

La FTM d'un système optique est une courbe qui traduit la variation du taux d'atténuation des contrastes en fonction de la fréquence spatiale. Ce taux peut être mesuré, pour une source lumineuse donnée, à l'aide de bancs optiques appropriés ; il est fréquemment estimé, notamment en photographie, par examen visuel de l'image obtenue à partir d'une mire de segments parallèles : plus la densité de traits augmente (en mm^{-1}), plus le contraste diminue, jusqu'à la limite de résolution du système où il n'est plus discernable. Comme dans le cas des fonctions de transfert en électronique, la FTM globale d'une chaîne optique est égale au produit des FTM des composants disposés en série.

Pour cette étude, l'évaluation de la FTM a été réalisée en parallèle de deux façons : analytiquement (composant par composant) et globalement.

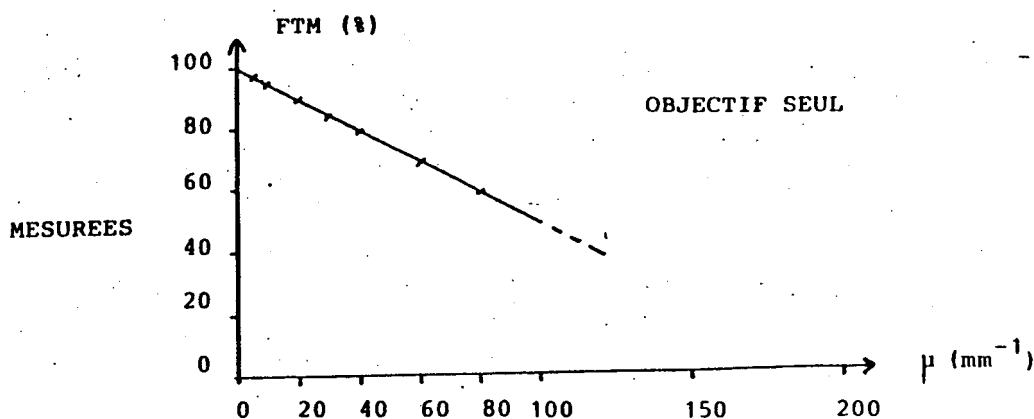
A) FTM du réseau :

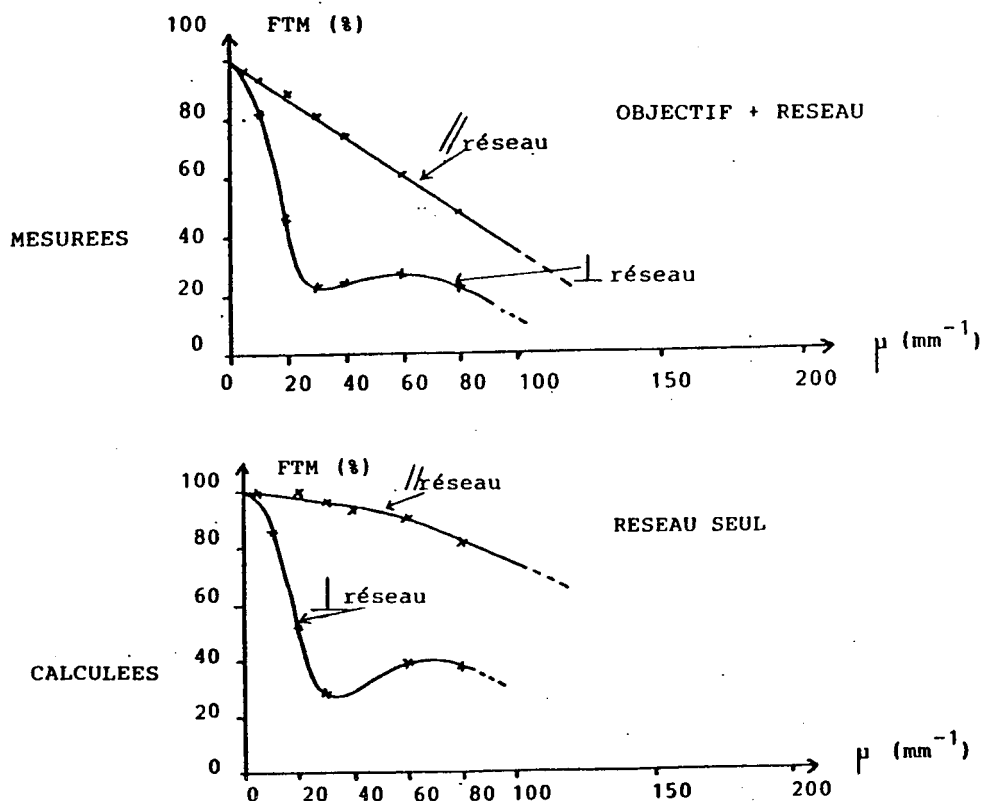
Le réseau de diffraction étant anisotrope par construction, il est caractérisé par deux courbes de FTM, correspondant respectivement au sens des traits et à sa perpendiculaire.

Plusieurs séries de mesures ont été effectuées à l'aide d'un banc ACOFAM (MATRA). Cet appareil assure l'analyse harmonique de l'image d'une fente étroite en mesurant les variations de flux à travers une mire sinusoïdale comportant plusieurs fréquences spatiales. La fente est placée au foyer d'un collimateur d'excellente qualité, et son image, après modification par la FTM de l'objectif étudié, est agrandie par un objectif de microscope. Le flux est mesuré par un photomultiplicateur à travers les mires constituées par des masques sinusoïdaux de haute précision (voir l'annexe 3). Les mesures étaient effectuées indirectement en montant le réseau sur un objectif de très bonne qualité préalablement étalonné (objectif KINOPTIK 75 mm, avec une ouverture de 5,6).

Les points de mesure de FTM que peut fournir le banc ACOFAM se situent aux fréquences spatiales suivantes :

5, 10, 20, 30, 40, 60 et 80 mm^{-1} . La FTM variant avec le spectre de la source lumineuse, une source blanche a été choisie pour sa représentativité du cas général. Les résultats moyennés de trois séries de mesures sont reportés sur les courbes ci-jointes.





On constate que dans le sens des traits du réseau, la FTM reste bonne (supérieure à 50 %) au-delà de 120 mm^{-1} .

B) FTM de l'objectif :

Malgré les contacts pris avec les représentants français de la marque MINOLTA, il n'a pas été possible d'obtenir une courbe de FTM pour l'objectif de l'appareil HI-MATIC. Cependant, par comparaison avec des mesures systématiques effectuées dans le passé sur de nombreux objectifs, il est possible d'estimer que la valeur de la FTM est d'environ 70 % pour 60 mm^{-1} et 60 % pour 80 mm^{-1} . En conséquence, la courbe présentée précédemment pour l'objectif-étalon utilisé avec le réseau doit être à peu près représentative de l'objectif ROKKOR, ainsi que la courbe "objectif + réseau".

On considère donc que la FTM de l'objectif seul reste supérieure à 50 % jusqu'à 100 mm^{-1} .

C) FTM du film :

Les laboratoires ILFORD n'ont été en mesure de communiquer que deux valeurs correspondant à la limite de résolution du film FP4, développé dans des conditions nominales avec le révélateur ID11, en suivant respectivement les normes internes ILFORD et les normes ANSI :

- Normes internes : 145 traits/mm
- Normes ANSI : 160 traits/mm

D) Synthèse :

En considérant que les trois courbes de FTM évoquées précédemment se combinent par multiplication, on voit que l'on peut estimer que dans la direction la plus favorable (parallèle

aux traits du réseau), l'information correspondant aux fréquences spatiales supérieures à 80 mm^{-1} n'est pas exploitable (FTM de l'ordre de 25 % ou moins).

E) Mesure globale empirique :

Afin de réaliser une évaluation directe de la chaîne optique complète, une série de photographies de mires du type évoqué précédemment a été réalisée ; le film a été soigneusement développé et les négatifs examinés au microscope.

Dans le meilleur des cas, parmi des dizaines d'essais, la fréquence spatiale maximale décelable a atteint la valeur de 60 traits/mm, l'information étant noyée dans le bruit au-delà.

Compte tenu de l'étape de digitalisation du négatif, décrite plus loin, il a été établi empiriquement qu'en fait on pouvait considérer une fréquence limite utile de :

$$\mu \text{ max.} = 40 \text{ mm}^{-1}, \text{ correspondant à une résolution :}$$

$$R = 25 \text{ }\mu\text{m.}$$

4.3. - DEVELOPPEMENT DES CLICHES -

La procédure de traitement des clichés doit être aussi standardisée que possible, afin de pouvoir comparer quantitativement entre eux les spectres extraits. Ceci implique, entre autres, que le développement soit fait de la même façon et avec les mêmes produits pour tous les clichés, même si cela se fait au détriment de la qualité de certains négatifs.

En effet, contrairement à la digitalisation et au traitement informatique, cette étape est irréversible et doit donc être traitée de manière à produire un matériel de base (négatifs) aussi homogène que possible. Ceci implique des choix correspondant au plus grand nombre de cas possible. En particulier, il apparaît dans la documentation ILFORD (voir l'annexe 2) que le révélateur réalisant le meilleur compromis entre finesse de grain et rapidité est le ID-11 dilué.

Sachant que dans l'exploitation des clichés on rencontrera aussi bien des problèmes de saturation, avec les sources lumineuses puissantes, que des problèmes de détection liés à des sources ténues, il est recommandé d'adopter le mode de développement suivant :

- Utilisation du révélateur ID-11 dilué (1 + 3), à une température constante de 20°C, avec agitation intermittente pendant 15 minutes, dans l'obscurité complète. Le produit ne peut être utilisé qu'une fois.

En ce qui concerne le fixage et le lavage, il est recommandé d'utiliser le fixateur ILFORD HYPAM et le mode de lavage décrit au § 8 de l'annexe 2.

4.4. - NUMERISATION DES CLICHES -

L'appareil utilisé est un analyseur/restituteur OPTRONICS C4500. Il permet de réaliser la numérisation sur bande magnétique d'un négatif transparent, avec les réglages suivants :

- pas d'échantillonnage : 200, 100, 50, 25 ou 12,5 microns.
- Taille de la fenêtre : 200, 100, 50, 25 ou 12,5 microns.
- Echelle en niveaux de gris : linéaire ou logarithmique.

En ce qui concerne l'échantillonnage, on voit que l'on peut satisfaire les conditions de Shannon correspondant à la limite de résolution $R = 25 \mu\text{m}$ trouvée plus haut, en utilisant un pas d'échantillonnage et une taille de fenêtre de 12,5 microns. Ce réglage garantit donc l'absence de perte d'information spatiale utile.

En fait, étant donné que les sources lumineuses décelables sur le cliché ne sont pas ponctuelles, on vérifie expérimentalement (au moins pour toutes les numérisations réalisées jusqu'à présent) qu'aucune perte d'information ni aucune distorsion n'est décelable si l'on passe à la valeur de $25 \mu\text{m}$ pour le pas d'échantillonnage et la taille de la fenêtre. Cette constatation prend toute sa valeur quand on considère le prix de revient d'une numérisation à $12,5 \mu\text{m}$ (plus d'une heure d'OPTRONICS pour un cliché).

En ce qui concerne l'échelle, le numériseur mesure en fait la transmittance T du négatif. En échelle linéaire, la dynamique est fixe et correspond à la plage de densités optiques de 0 à 3D. En revanche, en échelle logarithmique, la mesure est directement proportionnelle à la densité optique ($d = \log_{10} 1/T$), et la dynamique est réglable à l'aide de deux paramètres :

- valeur initiale : par pas de 0,1 D à partir de 0.
- plage : 0,5D, 1D, 2D ou 3D.

La densité optique des négatifs utilisés peut varier entre 0 et environ 2D. A titre d'exemple, les mesures suivantes ont été effectuées au micro-densitomètre :

- Fond du film : 0,1 D
- Pleine lune : 1 D (sans réseau)

On en déduit qu'un réglage standard correspondant au traitement normal doit être, pour utiliser au mieux la dynamique du numériseur :

- Echelle logarithmique
- Valeur initiale : OD
- Plage : 2D.

Cependant il faut noter que, contrairement au développement, cette opération n'est pas irréversible, et que l'étude particulière d'un cliché intéressant en utilisant au mieux les ressources d'OPTRONICS sur le plan de la dynamique d'image reste toujours possible.

5 - METHODE D'EXTRACTION : ANALYSE DE LA PARTIE INFORMATIQUE

5.1. - DESIGNATION DE LA SOURCE A ETUDIER -

Une fois numérisé, un cliché se présente sous la forme d'un fichier séquentiel sur une bande magnétique (9 pistes, 1600 bpi). Le premier besoin consiste donc en une visualisation de l'image sur un écran, afin de pouvoir désigner interactivement la source lumineuse dont on veut extraire le spectre.

Un cliché de 24×36 numérisé avec un pas d'échantillonnage de 25 microns comporte 960×1440 pixels (points élémentaires). Etant donné qu'un écran standard permet de visualiser 512×512 pixels, il est nécessaire de disposer d'un logiciel permettant de réaliser

un zoom sur le fichier (sous-échantillonnage par prélèvement de 1 point sur N), et de visualiser à pleine résolution n'importe quelle partie de taille 512 x 512 pixels dans le fichier. Ce besoin est encore plus évident si on échantillonne le cliché à 12,5 microns. Une fois que la zone d'intérêt du cliché est visualisée, il peut être nécessaire (cas de sources lumineuses faibles) de "manipuler" l'image pour mettre en évidence une source ou un spectrogramme. Les outils classiques dans ce domaine satisfont ce besoin : changement de FTL (fonction de transfert de luminance), pseudo-couleur, seuillage interactif.

Pour désigner au système la source lumineuse que l'on se propose d'étudier, il faut disposer d'un outil du type "manche à balai" qui permet d'introduire dans un programme les coordonnées dans l'écran du point choisi. Un zoom local permet de désigner le centre de cette source avec une bonne précision.

5.2. - DESIGNATION DU SPECTROGRAMME -

Si la source lumineuse étudiée se trouve au voisinage de l'axe optique de l'appareil photo, et donc du réseau de diffraction, le spectrogramme se trouve le long d'un axe de diffraction parfaitement rectiligne que l'on pourrait situer par rapport à la source à l'aide d'un seul point. Cependant, les tests ont prouvé que si la source s'approchait des limites du champ angulaire de l'objectif, l'approximation par une droite ne suffisait plus : la succession des ordres de diffraction semble constituer une ligne polygonale qu'il faut approcher plus finement.

Après divers essais et calculs, il s'est avéré que la façon la plus efficace de désigner le spectrogramme était une ligne polygonale dont l'opérateur désigne les sommets sur l'écran. Pour réaliser cette opération, il faut pouvoir "tracer" dans un plan graphique associé à l'image des segments de droite, et s'assurer de leur bon positionnement à l'aide d'un zoom interactif agissant simultanément sur l'image et le plan graphique.

5.3. - PROBLEMES LIES A LA SATURATION -

Sur le plan théorique, une première étude avait permis d'identifier deux outils de logiciel puissants pour améliorer l'extraction de spectres :

- Le calage transversal des points du spectrogramme mesurés, par recherche d'un maximum de corrélation avec la coupe densitométrique transversale de la source désignée.
- L'affinage du spectre extrait par déconvolution par la coupe densitométrique longitudinale de la source, qui n'est jamais vraiment ponctuelle.

Le fait que l'appareil photographique utilisé soit à pose automatique (non contrôlable) a pour conséquence immédiate que les sources lumineuses peu étendues photographiées de nuit apparaissent saturées. Dans le cas de sources assez puissantes (lune, réverbère pris de près), les ordres + 1 et - 1 du spectrogramme sont eux-mêmes partiellement saturés.

Les calculs de corrélation avec l'image de la source, que ce soit en monodimensionnel dans le sens longitudinal ou transversal, ou en bidimensionnel, ne sont donc pas possibles, et la meilleure approximation est obtenue, comme décrit précédemment, par interaction de l'opérateur.

5.4. - SUPERPOSITION DE L'IMAGE ET DU SPECTROGRAMME -

Si le fond du cliché étudié n'est pas franchement obscur, il convient d'essayer de retrancher sa contribution au signal prélevé le long de l'axe de diffraction. Puisqu'il s'agit d'une information "parasite" purement déterministe (le paysage), le seul procédé standard consiste à l'évaluer le long d'une (ou deux) ligne(s) parallèle(s) à la diffraction, aussi près que possible du spectrogramme.

Un outil de désignation interactive d'une (ou deux) ligne(s) polygonale(s) parallèle(s) à celle le long de laquelle le spectre est extrait a donc été développé.

L'utilisation de cet outil est délicate, car la soustraction d'un fond conduit à des résultats faux dès que le signal global est saturé.

Il est donc recommandé d'effectuer une première extraction de spectre sans soustraction de fond, afin d'identifier d'éventuelles zones de saturation, avant de procéder à l'extraction finale.

5.5. - CALIBRATION EN LONGUEUR D'ONDE -

La calibration en longueurs d'onde d'un spectre extrait doit pouvoir être effectuée à deux niveaux :

- si l'on peut disposer d'un ou de plusieurs clichés de calibration réalisés avec la même chaîne optique que la photographie étudiée (appareil + réseau + rouleau de film), et comportant des spectres de raies fines des longueurs d'onde connues, une procédure interactive de mesure directe permet de déterminer avec une bonne précision la dispersion (en principe linéaire) du dispositif.
- si ce n'est pas le cas, une dispersion moyenne peut être prise en compte par défaut.

Il est à noter que le système actuellement développé suppose un coefficient de dispersion constant le long de l'axe de diffraction, ce qui ne se vérifie que dans une première approximation. En particulier, une constante de dispersion mesurée sur un ordre + 1 ou - 1 conduit à un calage spectral imprécis pour un ordre de + 2 ou - 2, et vice-versa. Seule la constitution d'un catalogue de clichés de calibration permettrait d'approcher un modèle de calage spectral plus élaboré.

En ce qui concerne la réalisation de clichés de calibration lorsqu'il reste des vues à prendre sur un rouleau, les priorités à respecter sont les suivantes :

- Photographier au moins une source se présentant sous la forme d'une fente fine perpendiculaire à l'axe de diffraction, avec un spectre de raies connues comprises dans le domaine d'intérêt (4000 Å à 6300 Å). Cette source, qui doit être placée dans l'obscurité dans l'axe optique de l'appareil, peut être par exemple une lampe au cadmium ou au mercure.
- Photographier la même source placée en différents points du champ angulaire, et en particulier dans un coin, afin d'effectuer ultérieurement la calibration à partir de la position angulaire la plus proche de celle de la source étudiée. Cette précaution permet d'affiner la précision en englobant dans la calibration les "perturbations géométriques" en-dehors de l'axe du réseau.

5.6. - CALIBRATION EN DENSITE -

Dans l'état actuel du système, aucune calibration en densité n'est effectuée, car son utilité ne pourra être démontrée qu'à partir d'une étude statistique sur les composants de la chaîne optique. L'objectif essentiel se limite à localiser les raies spectrales et à comparer leurs amplitudes relatives à l'intérieur du spectre.

Cependant, il serait simple d'introduire une telle calibration, si elle se révélait utile, sous la forme de photographies de mires en densité. L'opérateur pourrait ultérieurement, sur son écran, désigner les zones de l'image représentant des valeurs données de densité optique, et le traitement à effectuer se résumerait à une simple modification de la Fonction de Transfert de Luminance (FTL).

6 - MISE EN OEUVRE DU PROGRAMME D'EXTRACTION –

6.1. - ORGANISATION GENERALE -

Un programme interactif "XSPECT" d'extraction de spectres a été développé, mettant en jeu les équipements suivants :

- MITRA 15, avec un disque, une unité de bandes magnétiques, une imprimante électrostatique.
- Console TRIM de traitement d'images, avec 2 mémoires d'images (512 x 512 pixels) et leurs plans graphiques associés, le manche à balai et les touches de fonctions.
- Console graphique TEKTRONIX (4000 points) et son clavier.
- Imprimante VERSATEC.

Ce programme, écrit en FORTRAN et chargé en overlay, est articulé autour d'un "menu" d'actions que l'utilisateur peut déclencher à son gré. L'interaction homme-programme se fait sur la TEKTRONIX en ce qui concerne les informations alphanumériques, et sur l'écran de la TRIM en ce qui concerne les images. Les tracés de spectres sont faits sur la TEKTRONIX, et l'utilisateur peut à tout instant obtenir une copie sur papier du contenu de l'écran de cette console.

Les images numérisées (étudiées ou de calibration) sont stockées sur bandes magnétiques, et les commandes élémentaires offertes à l'utilisateur au menu sont les suivantes.

- FI : fin d'utilisation de XSPECT
- ME : édition du menu sur la TEKTRONIX
- ML : passage en mode local de manipulation d'image
- LS : lecture de la source étudiée sur bande
- LC : lecture de l'image de calibration sur bande
- ES : désignation interactive des éléments utiles du cliché à étudier
- EC : désignation interactive des éléments utiles de l'image de calibration
- SB : tracé des spectres bruts de la source étudiée et éventuellement de celle prise pour calibration
- CC : Calcul de calibration, lorsqu'existe une image de calibration
- SF : calcul et tracé du spectre final, avec ou sans soustraction du fond.

6.2. - ETAPES DU TRAITEMENT -

Les commandes élémentaires listées précédemment déclenchent respectivement les tâches suivantes :

- **FI** : Rembobinage de la bande couramment montée et sortie du programme.
- **ME** : Effacement de l'écran de la TEKTRON et édition du menu de commandes.
- **ML** : Accès aux outils de manipulation locale de l'image visualisée sur l'écran. Cette fonction est particulièrement utile lorsque l'on a chargé et visualisé l'image à étudier et que l'on veut la scruter en détail. Les possibilités les plus utiles sont :
 - le zoom
 - le décadrage
 - le seuillage (détection des sources ténues),
 - la pseudo-couleur.
- **LS** : Chargement en mémoire d'image et visualisation de l'image à étudier. L'utilisateur indique le numéro du fichier sur la bande, le point de départ de la visualisation (512 x 512 à prendre sur un fichier plus grand), le taux de sous-échantillonnage (zoom par logiciel de 2,4 ou 8).
- **LC** : Chargement identique de l'image de calibration.
- **ES** : Introduction interactive à l'aide du manche à balai des éléments du spectrogramme étudié source et sommets d'une ligne polygonale suivant l'axe de diffraction. Au cours de ces opérations, l'utilisateur a accès aux fonctions de zoom et de décadrage, et suit l'évolution de son tracé sur le plan graphique associé à l'image.
- **EC** : Introduction identique des éléments du spectrogramme de calibration. Pour chaque point désigné, à part la source, l'utilisateur peut introduire sur la TEKTRON la longueur d'onde correspondante.
- **SB** : Obtention du tracé des spectres bruts, sans échelle. L'opérateur doit choisir un ordre +2, +1, -1, ou -2, désigné par la lettre A, B, C, ou D affectée d'un signe + ou - (sans signification dans l'état actuel du programme).
- **CC** : Déclenchement des calculs de calibration en longueurs d'onde. La source de calibration et tous les points du spectrogramme préalablement introduits avec une longueur d'onde (commande EC) sont automatiquement visualisés sur l'écran les uns après les autres à pleine résolution, pour permettre à l'opérateur de raffiner leur localisation interactive avec le manche à balai. Puis, le programme calcule par moyennage sur les données introduites un coefficient de dispersion linéaire en longueur d'onde, qu'il affiche sur la TEKTRON, et conserve en mémoire jusqu'à nouvel ordre, à la place de la valeur standard par défaut.
- **SF** : Déclenchement du calcul final et du tracé du spectre extrait. Le programme visualise automatiquement sur l'écran, et à pleine résolution, la source étudiée (pour localisation fine), puis l'ordre préalablement choisi (commande SB). L'utilisateur peut ajuster sa ligne polygonale, et décider de soustraire ou non le fond de l'image. S'il le fait, il a le choix entre une ligne polygonale parallèle à la précédente, ou deux lignes équidistantes de part et d'autre. Le programme lui permet de positionner cette ou ces

lignes, de façon interactive, et de déclencher le tracé final quand il a fait son choix. Ce tracé apparaît sur la TEKTRON avec une grille de coordonnées.

7 - PROCEDURE STANDARD DE TRAITEMENT DES CLICHES -

Ce chapitre récapitule l'ensemble des actions standard correspondant au traitement des clichés du GEPAN.

7.1. - CLICHES DE CALIBRATION -

Il est demandé aux gendarmes qui ont des clichés à soumettre à l'analyse d'envoyer toute la "chaîne optique" : appareil, réseau et pellicule chargée. Selon le nombre de prises de vues restant à prendre, les clichés de calibration suivants sont à réaliser, par ordre d'importance décroissante :

- une fente émettant un spectre de raies (Na, Cd ou Hg par exemple), placée dans l'obscurité dans l'axe de visée.
- la même source située dans un coin du champ angulaire.
- Une mire de densités.

7.2. - DEVELOPPEMENT DU FILM -

Utilisation de révélateur ILFORD ID-11 dilué (1 + 3), à 20°C, en agitant de façon intermittente durant 15 minutes, et dans l'obscurité complète (cuve à spirales).

Fixage à l'aide du fixateur ILFORD HYPAM

Lavage et rinçage avec l'agent mouillant ILFORD ILFOTOL, conformément aux indications du § 8 de l'annexe 2.

7.3. - NUMÉRISATION -

Utilisation de l'analyseur OPTRONICS, avec les réglages suivants :

- pas d'échantillonnage : 25 microns,
- taille de la fenêtre : 25 microns,
- échelle de niveaux de gris : logarithmique,
- plage de densités optiques : 0 à 2 D.

7.4. - EXTRACTION DU SPECTRE -

Mise en oeuvre du programme XSPECT, et production des graphes représentant les spectres bruts et finaux de la source étudiée.

7.5. - TRAITEMENT SPECIFIQUE (OPTIONNEL)

La dynamique de l'image numérisée peut être optimisée en utilisant les ressources de l'OPTRONICS, en particulier si le cliché est très peu contrasté. En outre, pour des cas particuliers, on peut envisager une numérisation avec un pas de 12,5 µm.

Dans le domaine informatique, il va de soi que des programmes particuliers peuvent être développés et utilisés au coup par coup, si l'intérêt d'un cliché le justifie. La richesse des bibliothèques de programmes spécialisés en traitement d'images disponibles peut être exploitée efficacement si ce type de travaux se révèle utile.

8 - CATALOGUE DE SPECTRES DE SOURCES CONNUES -

Une méthode de gestion simple permet de caractériser chaque rouleau de pellicule archivé par un nombre hexadécimal à 4 chiffres (de '8000' à 'FFFF'), les clichés étant individuellement numérotés sur le film lui-même. Actuellement, 9 rouleaux sont disponibles :

- 4 développés au CNES au titre d'essais préliminaires (calibration et gendarmerie).
- 1 envoyé par la gendarmerie de SAUMUR avec un P.V., mais ne comportant pas de spectre exploitable.
- 2 correspondant à des sources lumineuses photographiées de nuit à PARIS (pendant la période de mise au point).
- 1 contenant des photographies de mires destinées à évaluer la chaîne optique.
- 1 constituant le petit catalogue présenté ci-après.

Afin de rassembler une collection de spectres correspondant à des sources lumineuses courantes, une campagne de prise de vues a été menée en été 1982, au cours de laquelle 26 photos ont été prises à l'aide du matériel de la Gendarmerie Nationale (rouleau '8008'). Les pages suivantes reproduisent 14 spectres extraits de ces photos, la calibration étant réalisée à l'aide d'une lampe au sodium. On notera qu'aucune photo d'étoile n'a pu fournir de spectrogramme exploitable, même à l'aide des outils de manipulation d'image (entre autres essais infructueux : VEGA).

Les clichés dont sont extraits les spectres présentés sont les suivants :

- cliché 3 : phare jaune de voiture en code à 50 m
- cliché 5 : réverbère blanc au loin (environ 150 m)
- cliché 6 : lampe de poche blanche à 30 m
- cliché 7 : bougie à 20m
- cliché 8 : chalumeau à 20 m
- cliché 9 : lampe à pétrole à 20 m
- cliché 10 : télévision en couleur à 30 m
- cliché 11 : ampoule ordinaire à 20 m
- cliché 12 : tube au néon à 20 m
- cliché 14 : réverbère de près (à 10 m)
- cliché 15 : phare jaune de bicyclette à 20 m
- cliché 19 : réverbère à l'horizon (pose très longue)
- cliché 26 : lune
- cliché 29 : reflet de la lune dans une vitre à 1 m

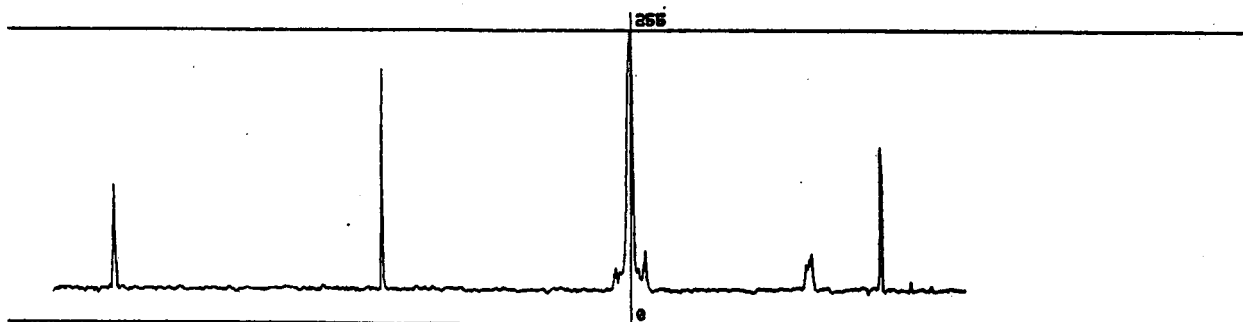
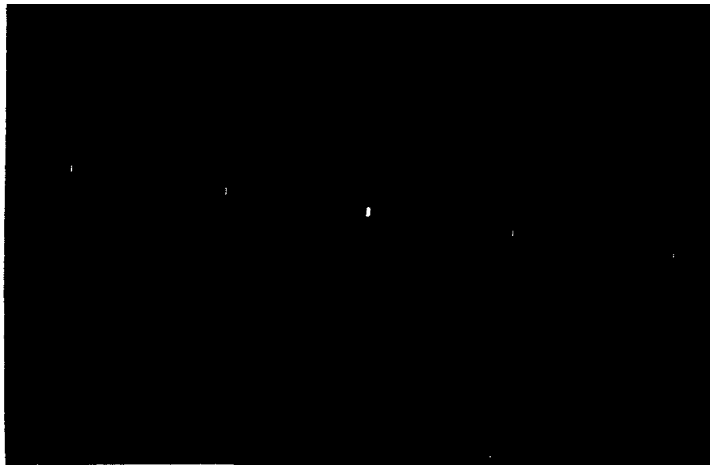
Le cliché utilisé pour la calibration est :

- cliché 21 : lampe au sodium derrière une fente fine, à 2 m.

CLICHE 8008/21

Lampe au sodium derrière une fente fine, à 2m.

Cliché utilisé pour la calibration en longueurs d'onde (raie double autour de 5884 Å).

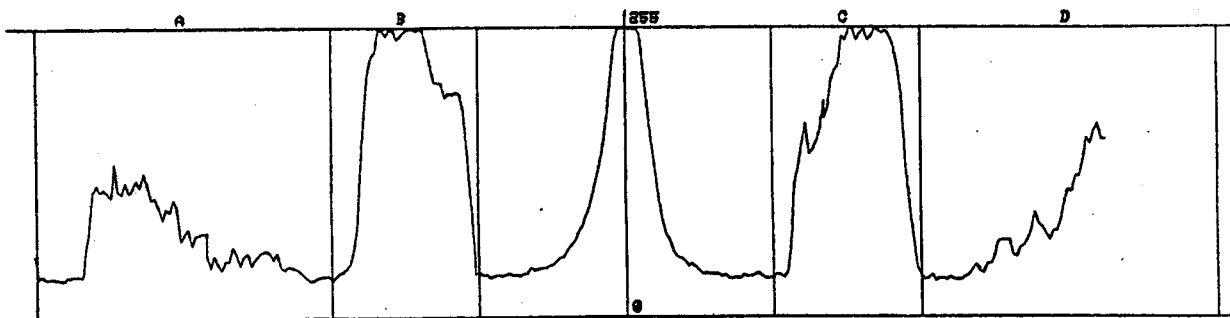
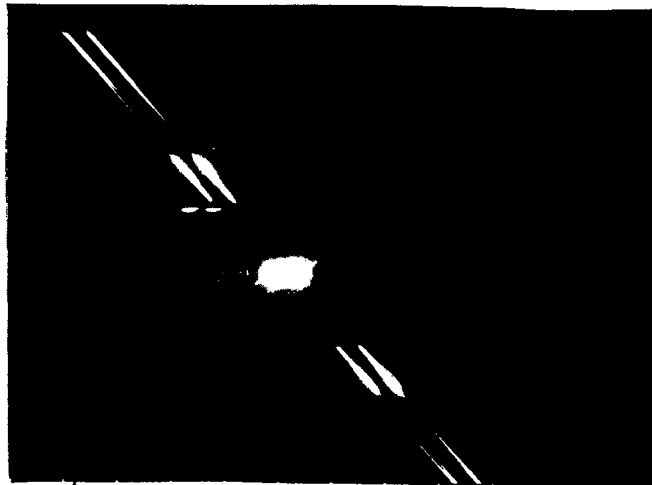


SPECTRE BRUT DE LA SOURCE CALIBREE

CLICHE 8008/03

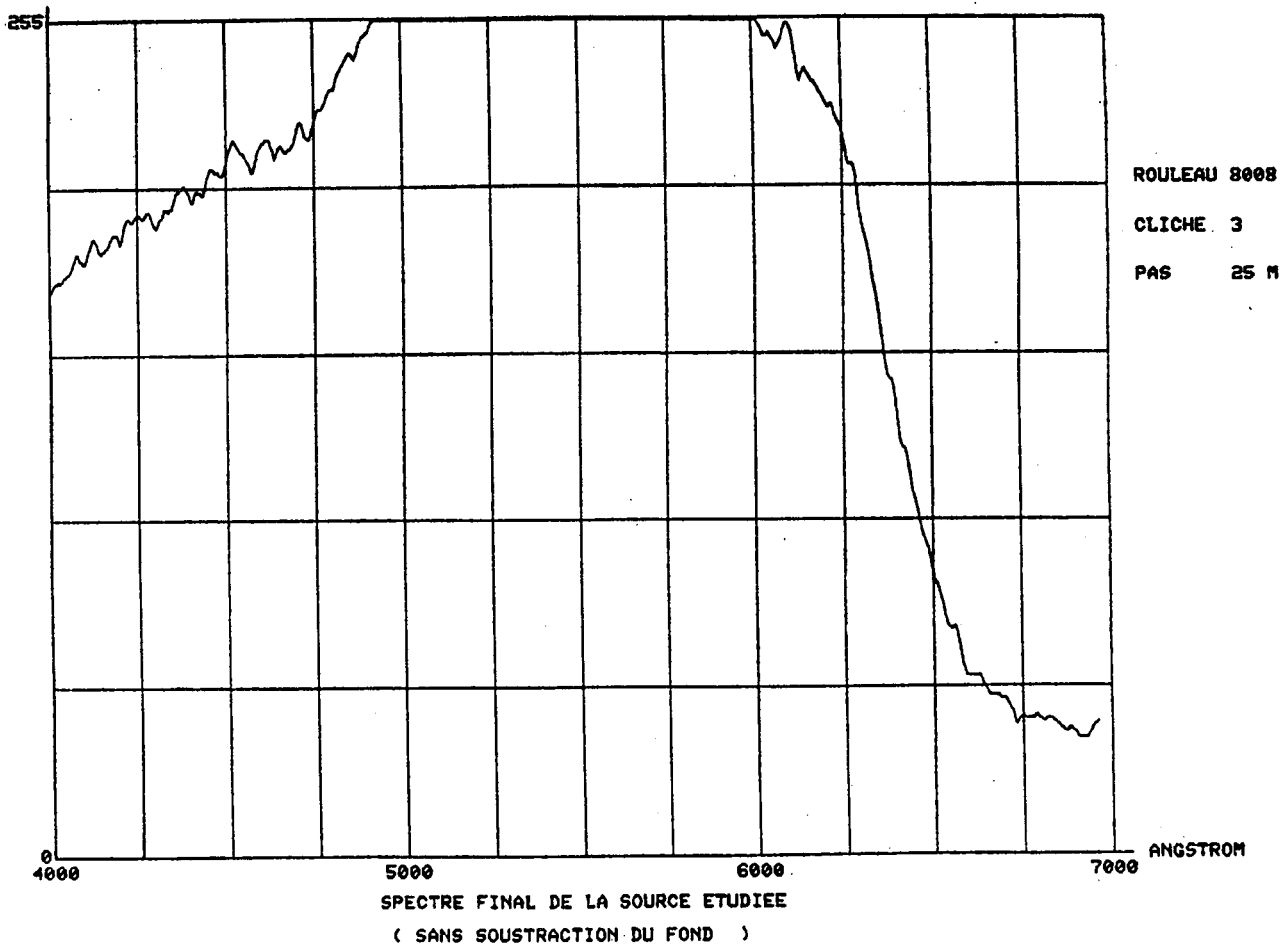
Phare jaune de voiture en code, à 50m.

Première extraction le long d'un ordre saturé: la phase d'extraction brute a été faite de façon approximative (définition du polygone d'extraction) et l'ordre B paraît peu saturé sur le spectre brut. Cependant l'extraction fine révèle que cet ordre était en fait saturé.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

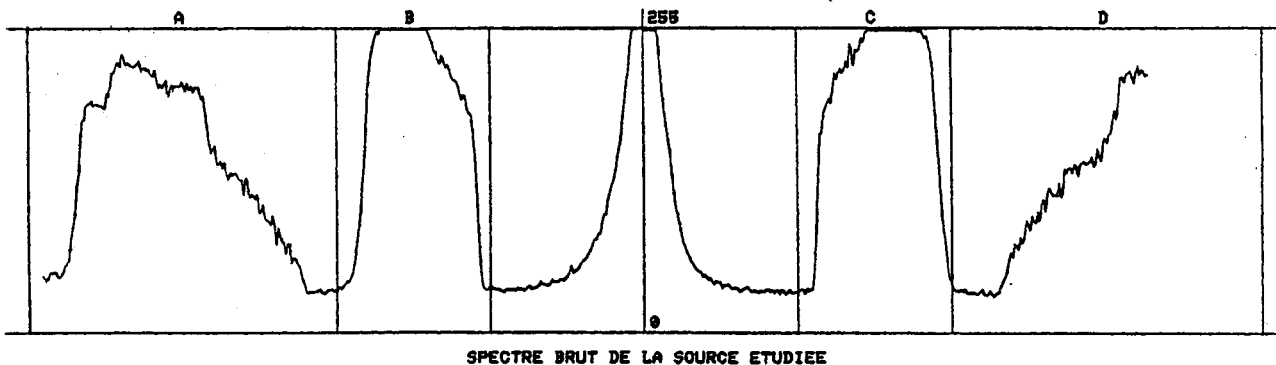
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -B



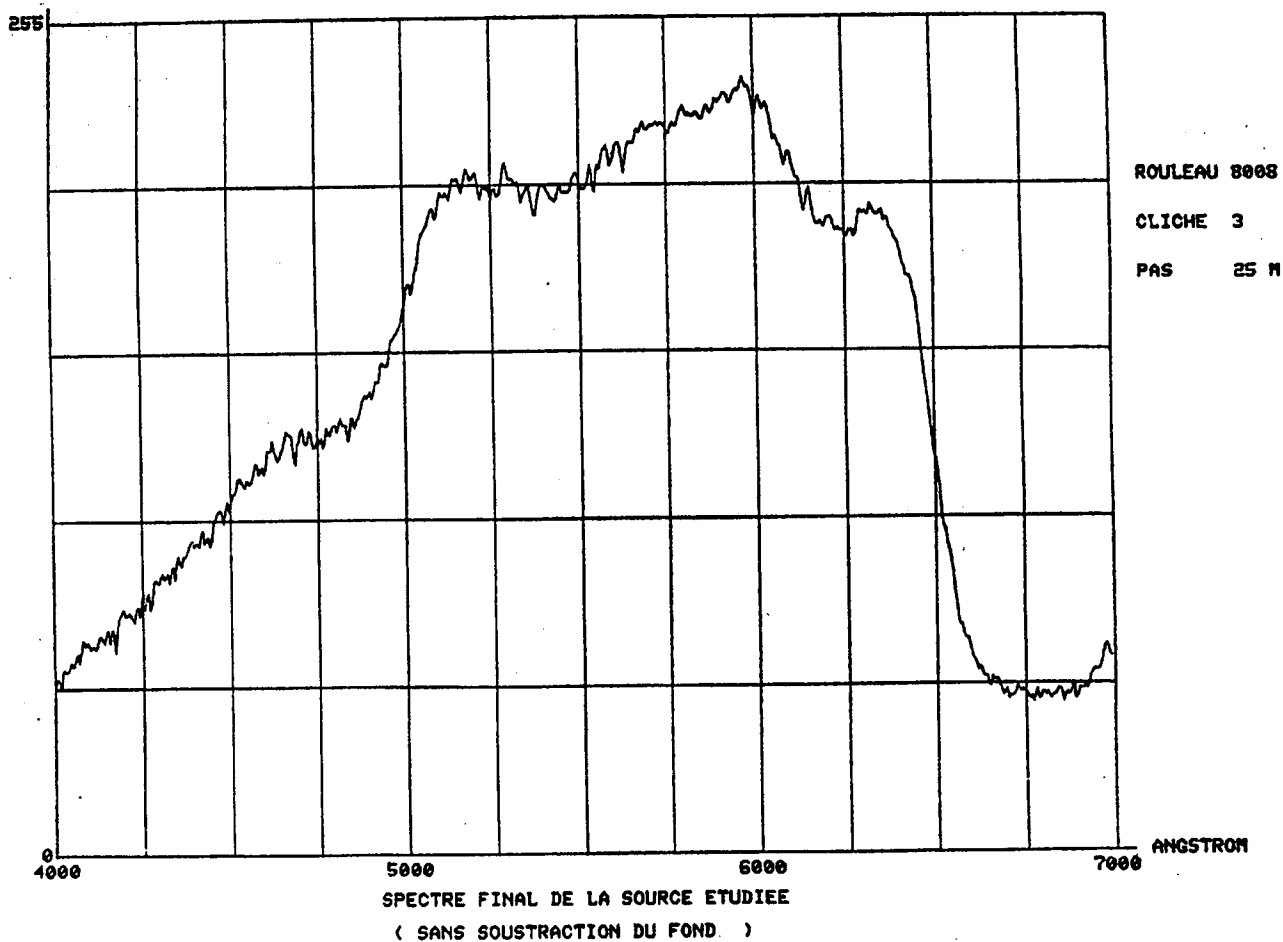
CLICHE 8008/03

(voir page précédente)

Seconde extraction le long d'un ordre non saturé ,
une extraction brute plus soignée conduit à un
spectre brut différent du précédent. La précision
du spectre brut ne préjuge pas de la qualité du
spectre final : le spectre brut ne sert qu'à une
visualisation grossière des quatre ordres.



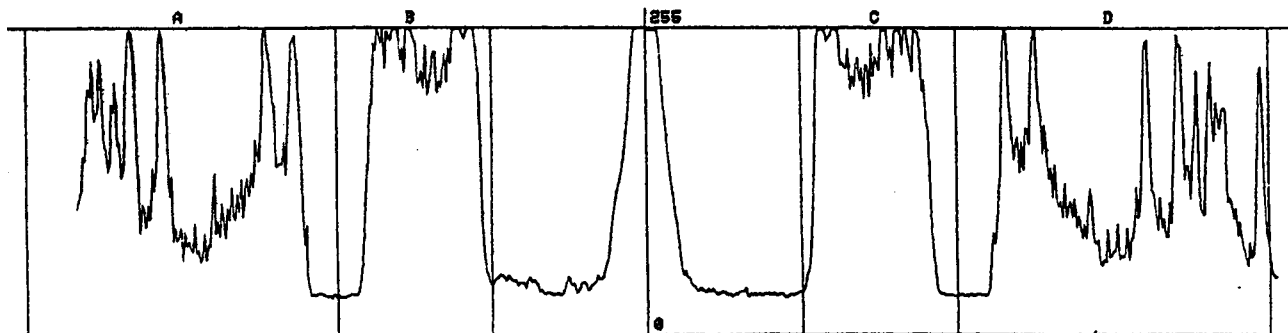
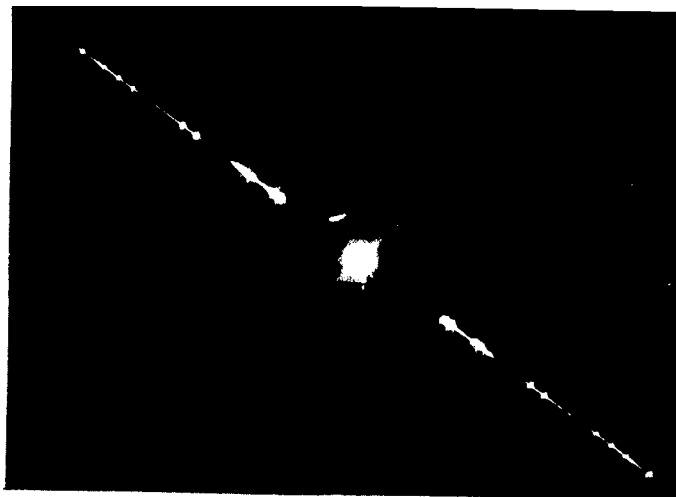
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -A



CLICHE 8008/05

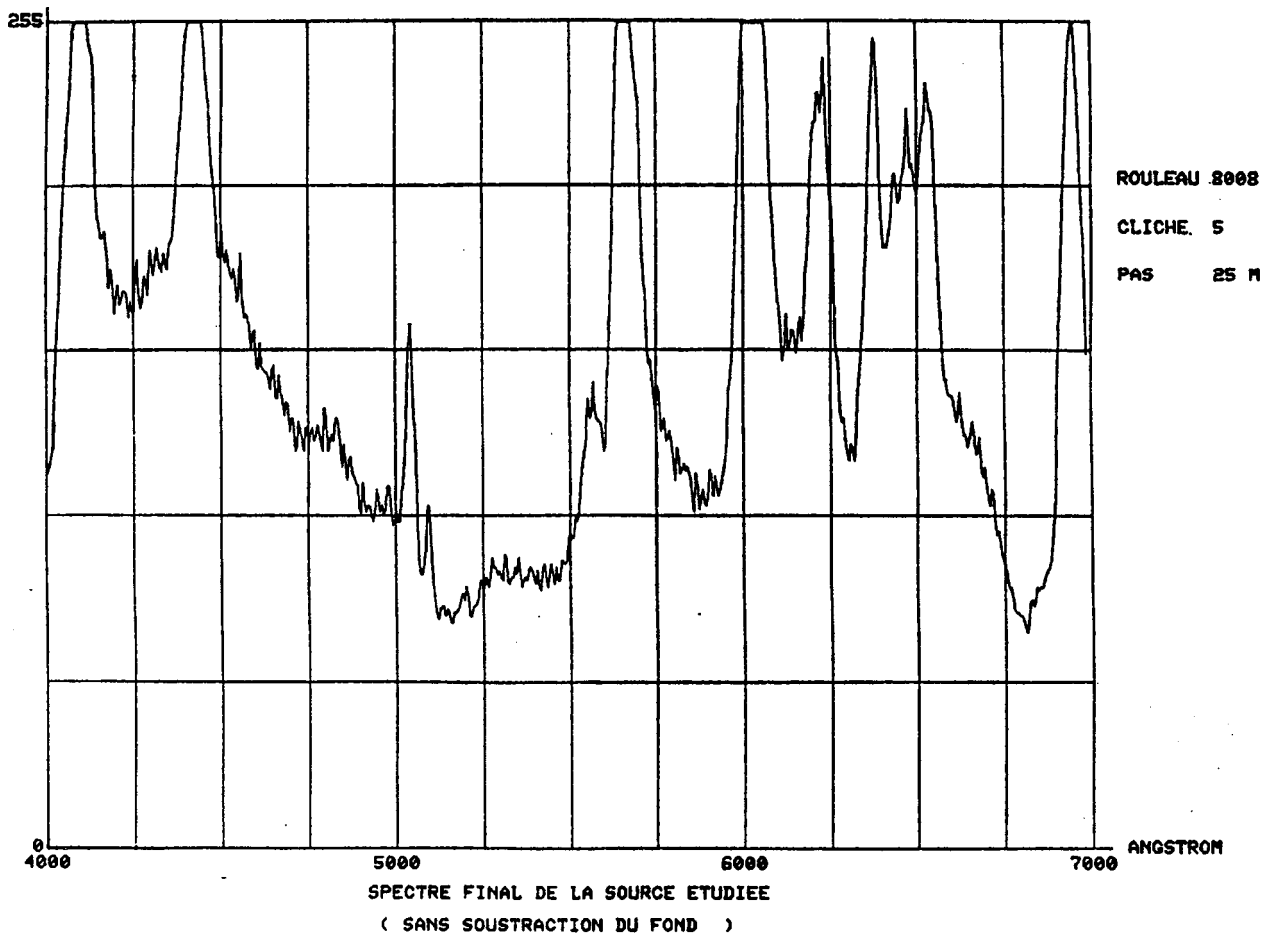
Réverbère blanc au loin (environ 150m).

Spectre comportant des raies partiellement saturées.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -D

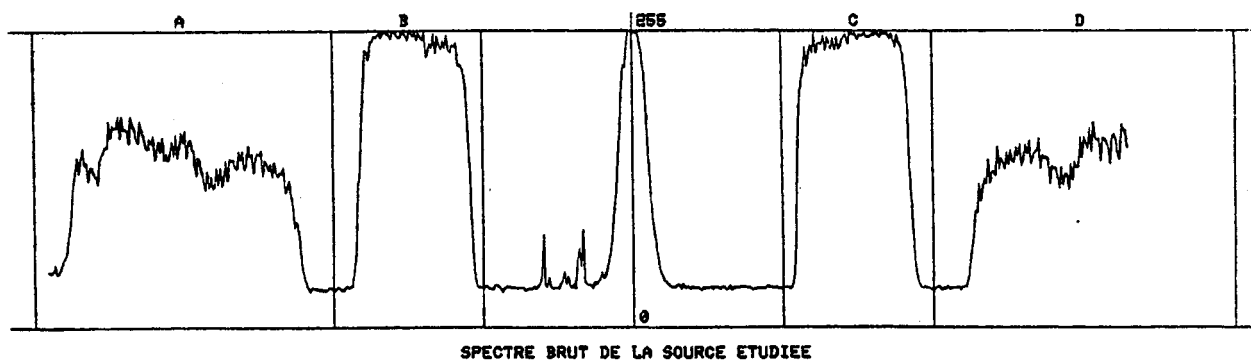


CLICHE 8008/06

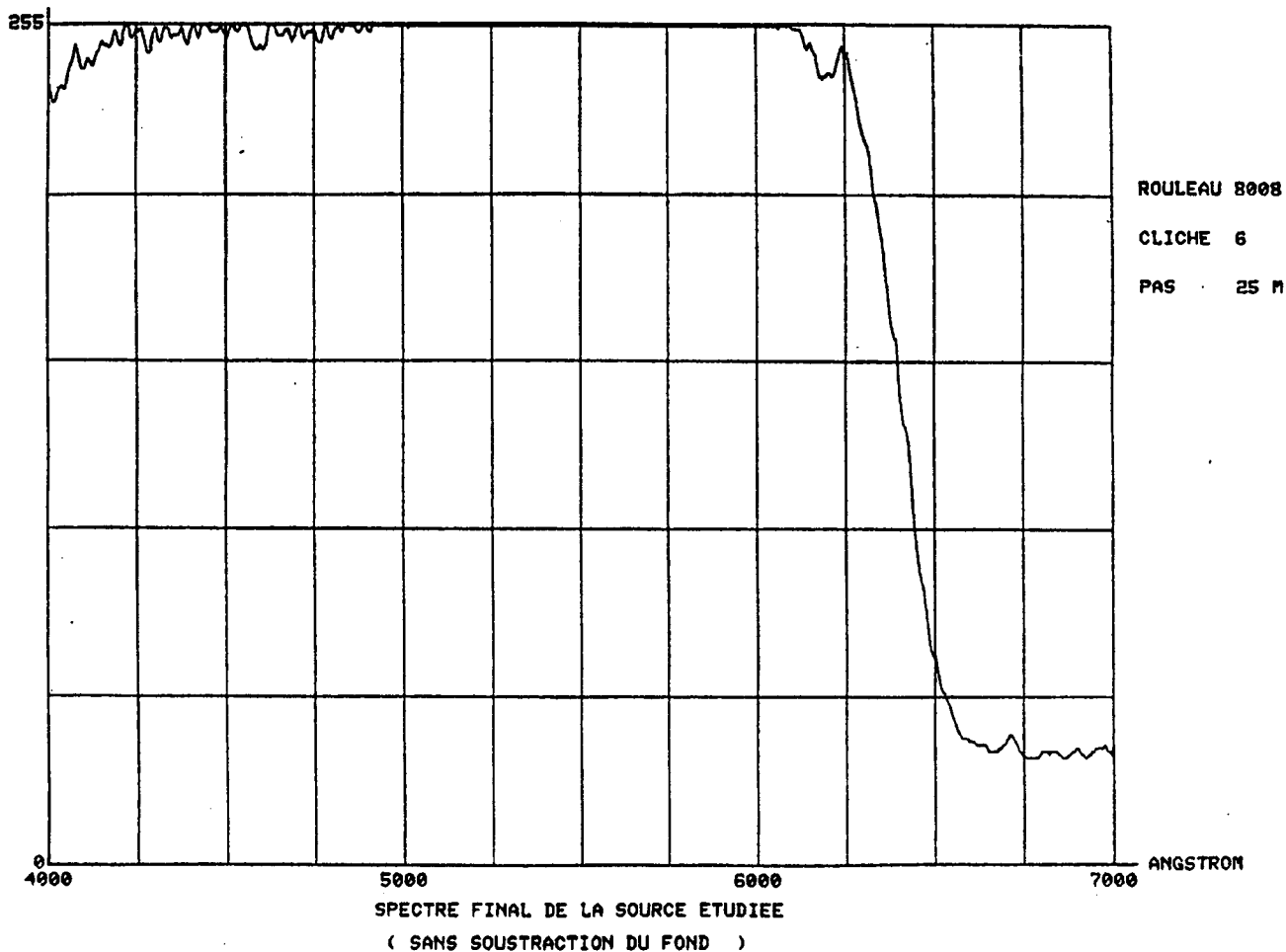
Lampe de poche blanche, à 30m.

Première extraction le long d'un ordre tout-à-fait saturé.

(même remarque que pour le cliché 8008/03, page 20).



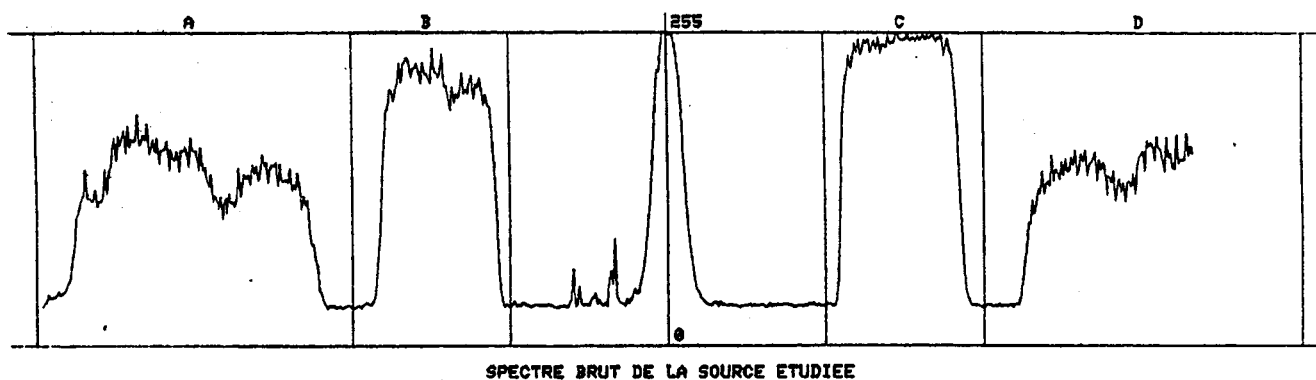
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -B



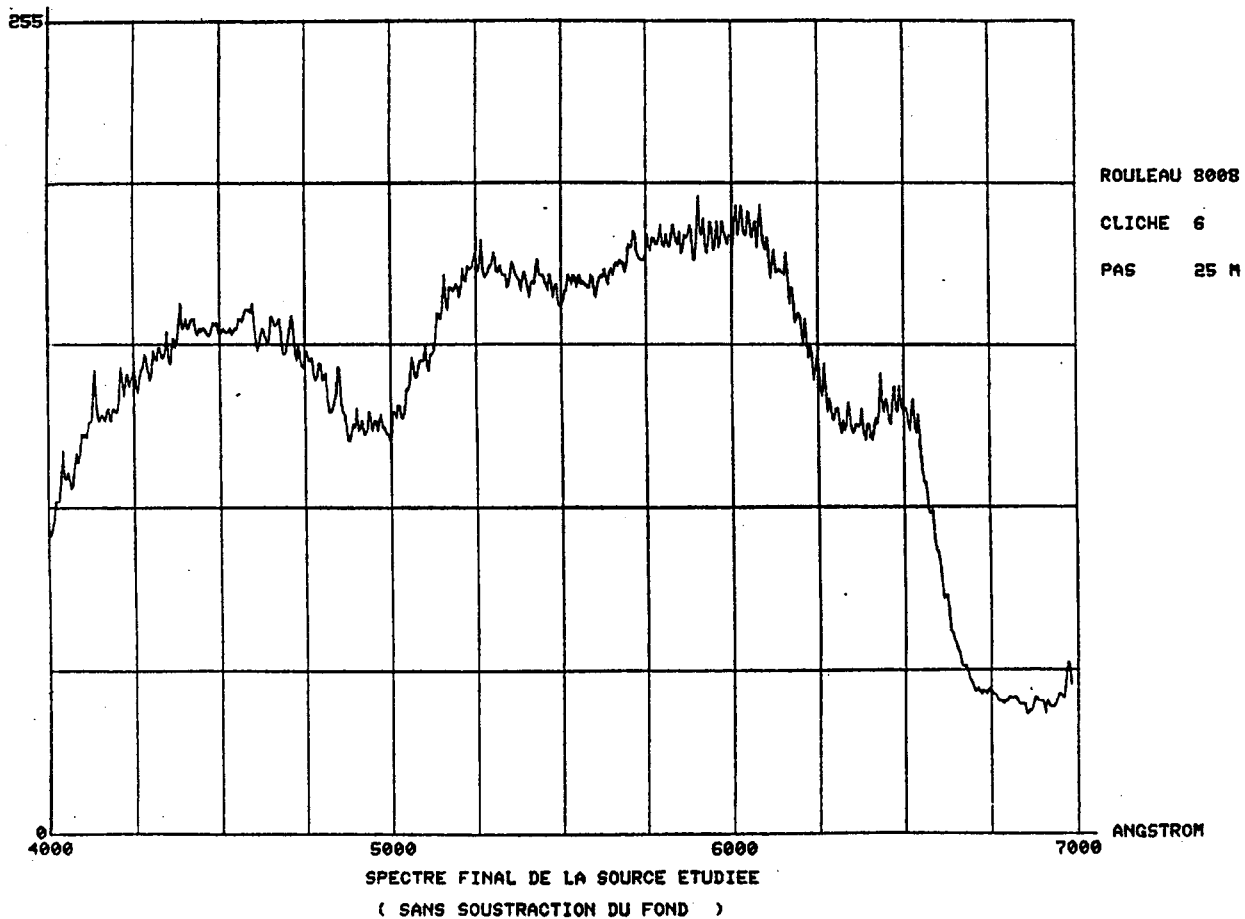
CLICHE 8008/06

(voir page précédente)

Seconde extraction le long d'un ordre non saturé.
(même remarque que pour le cliché 8008/03, page 22)

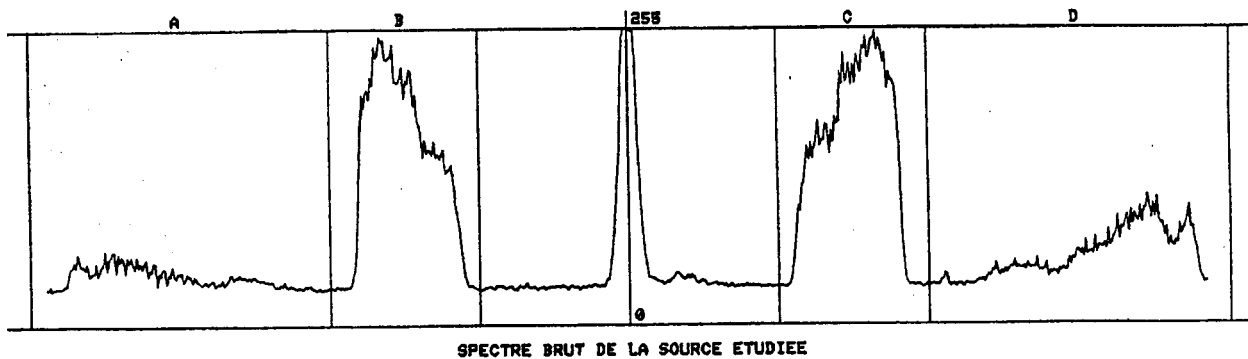
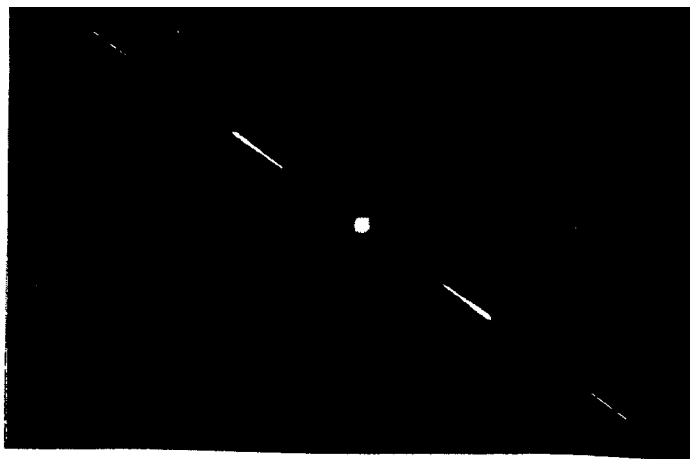


ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A, -C) : -A

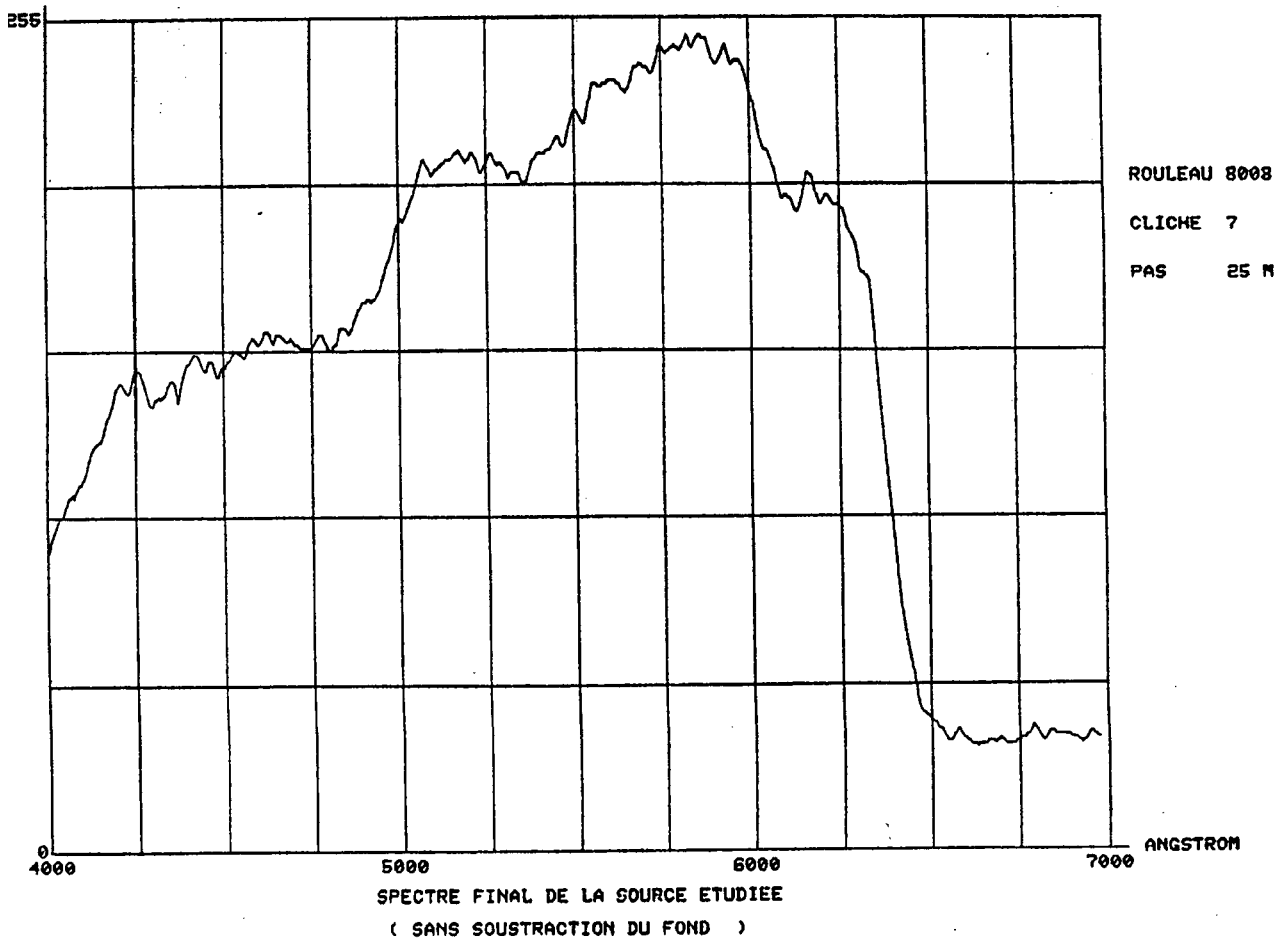


CLICHE 8008/07

Bougie, à 20m.



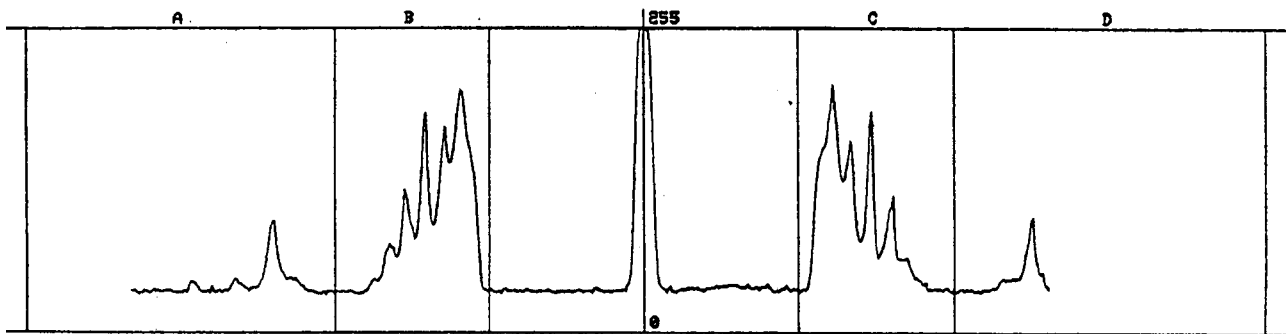
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -B



CLICHE 8008/08

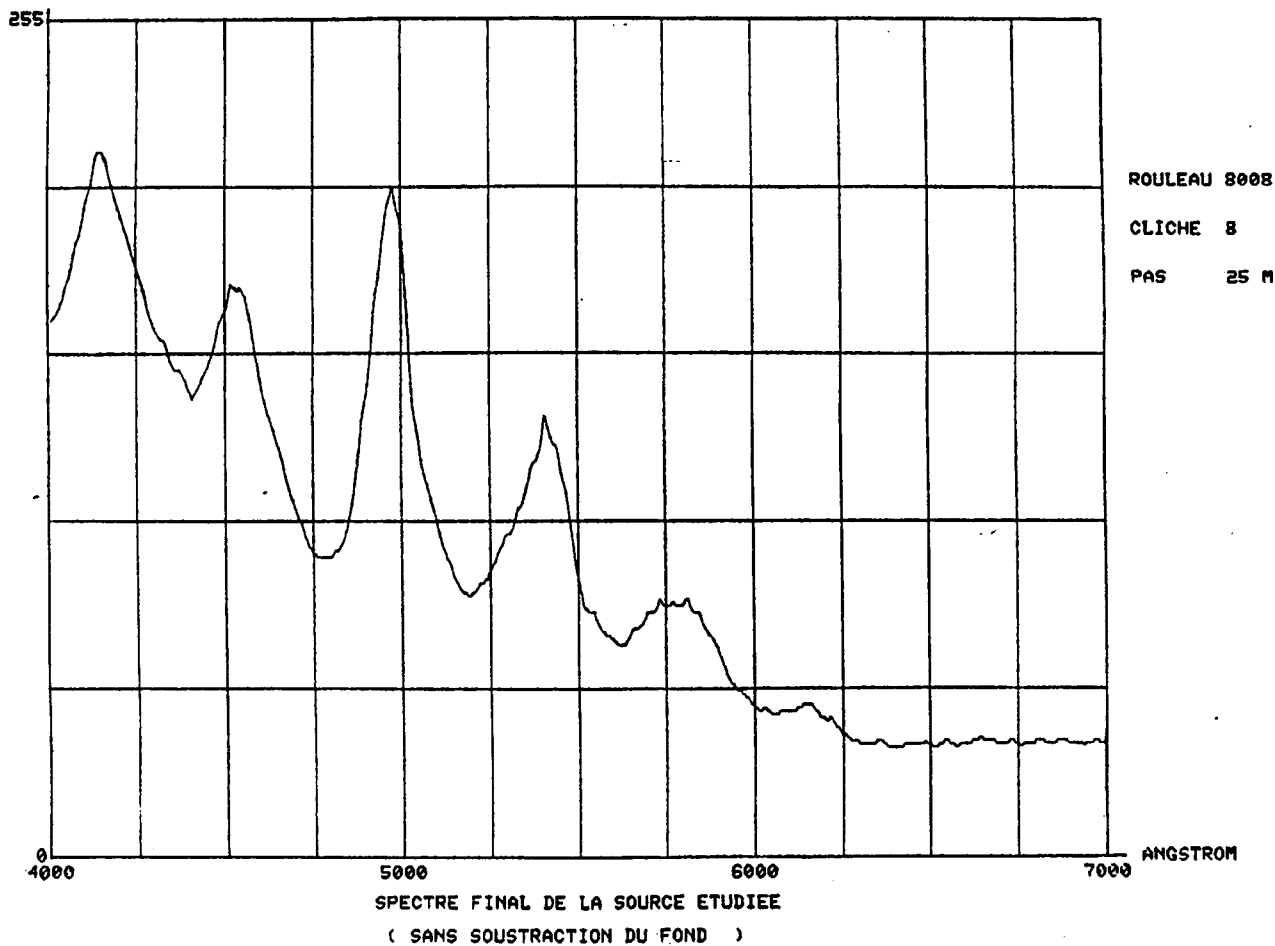
Chalumeau, à 20m.

Spectre de raies.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

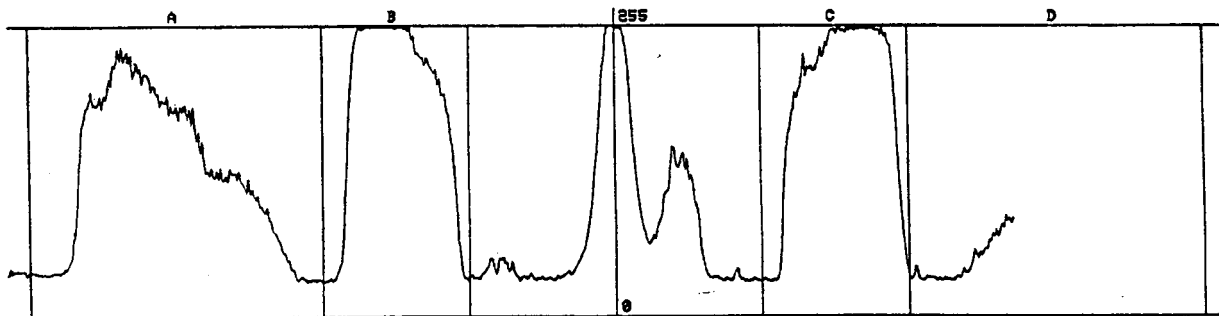
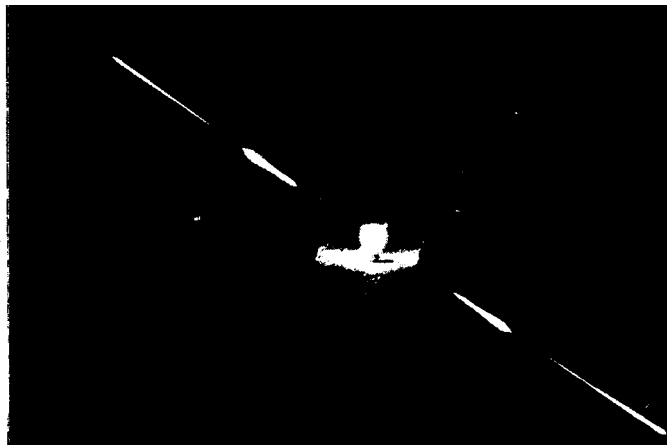
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -B



CLICHE 8008/09

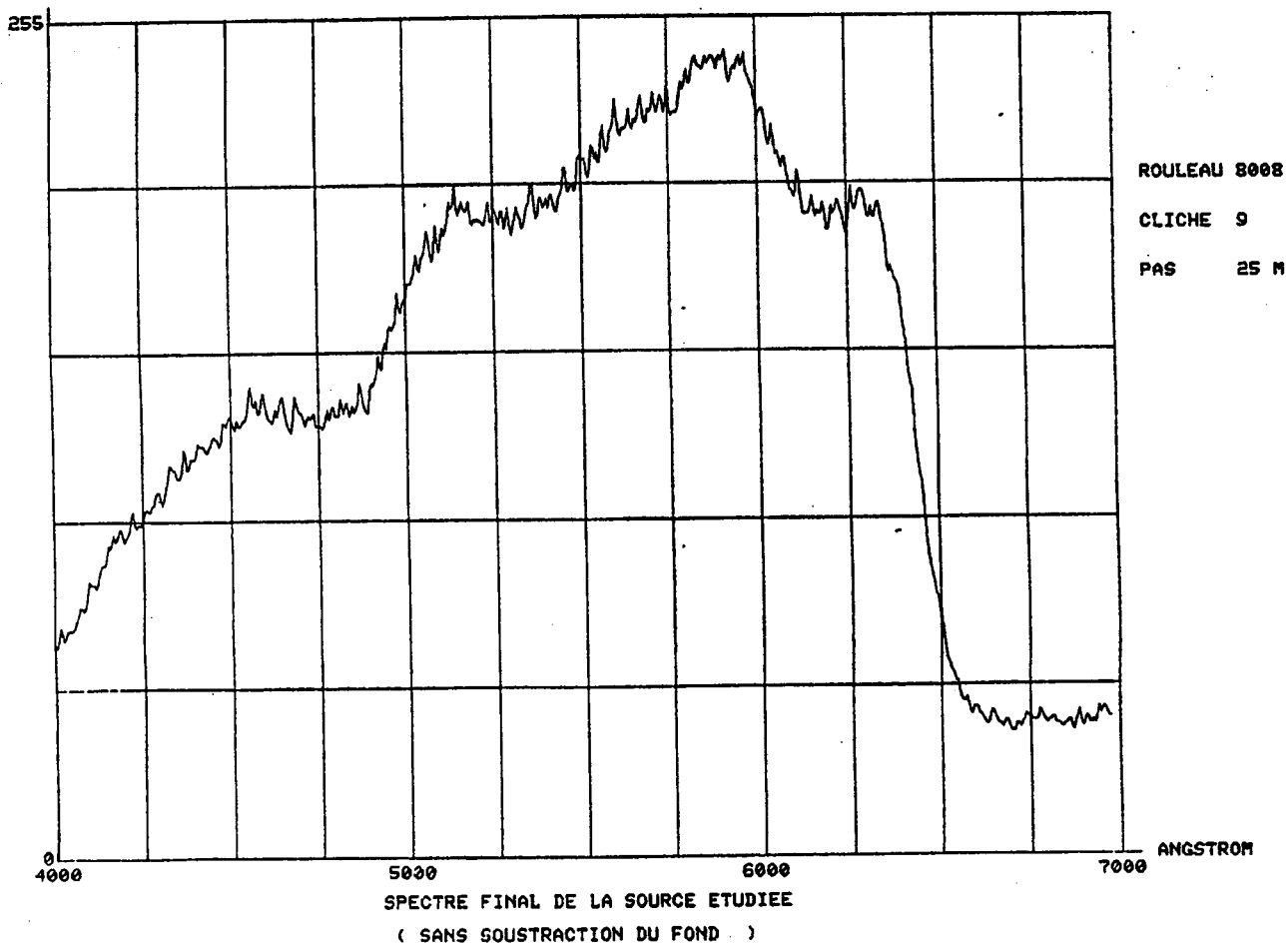
Lampe à pétrole, à 20m.

Spectre semblable à celui de la bougie (cliché 07).



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

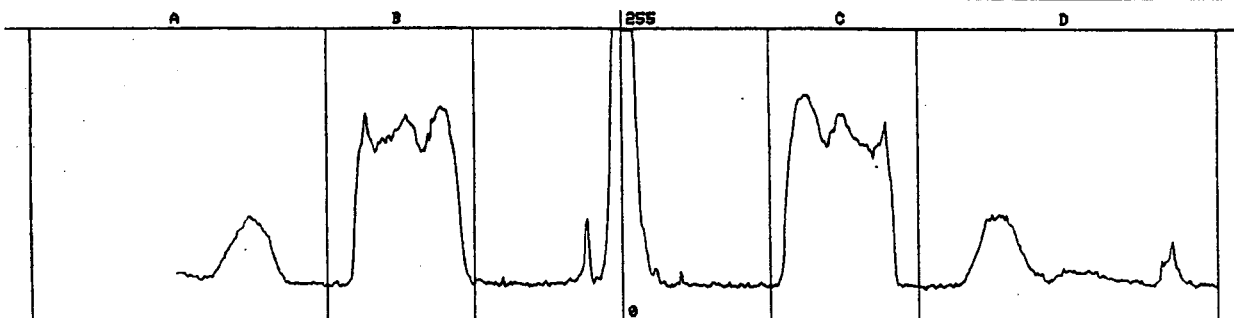
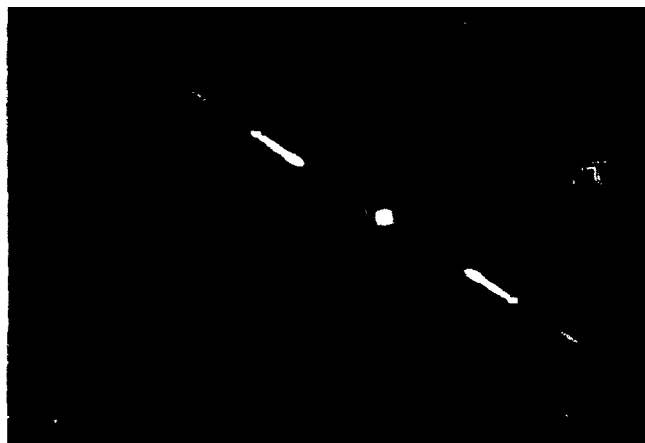
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -A



CLICHE 8008/10

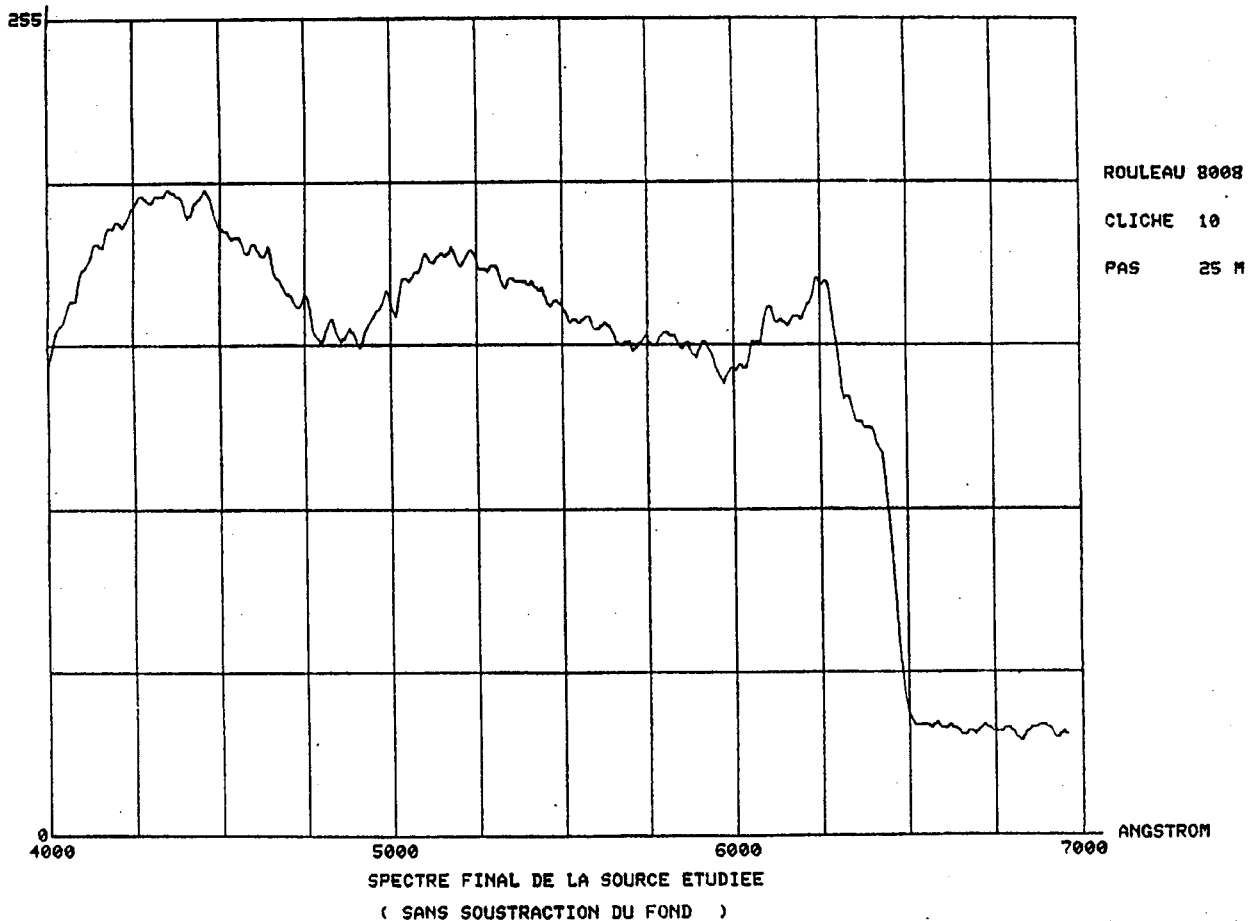
Téléviseur en couleurs, à 30m.

Noter la dominance des 3 couleurs élémentaires.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

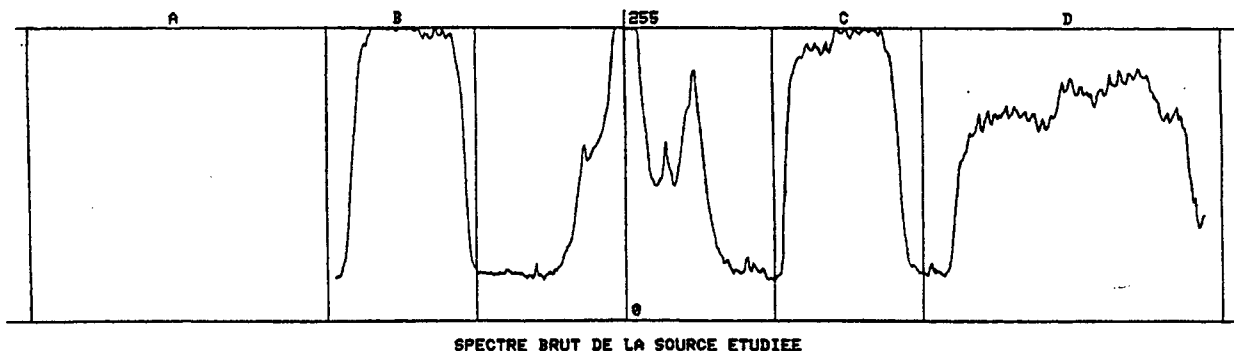
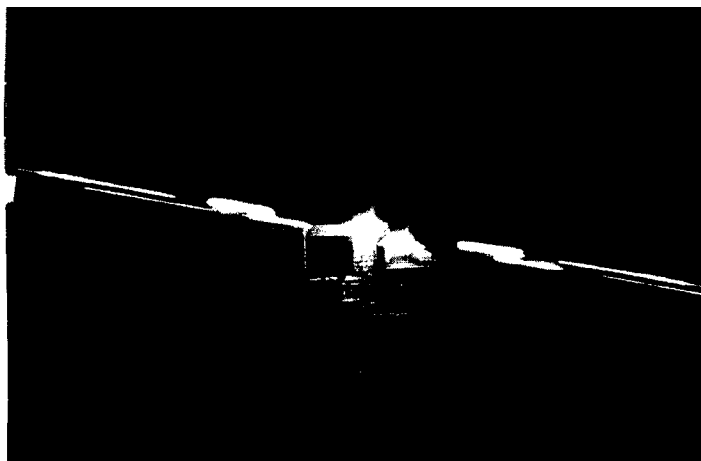
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -C



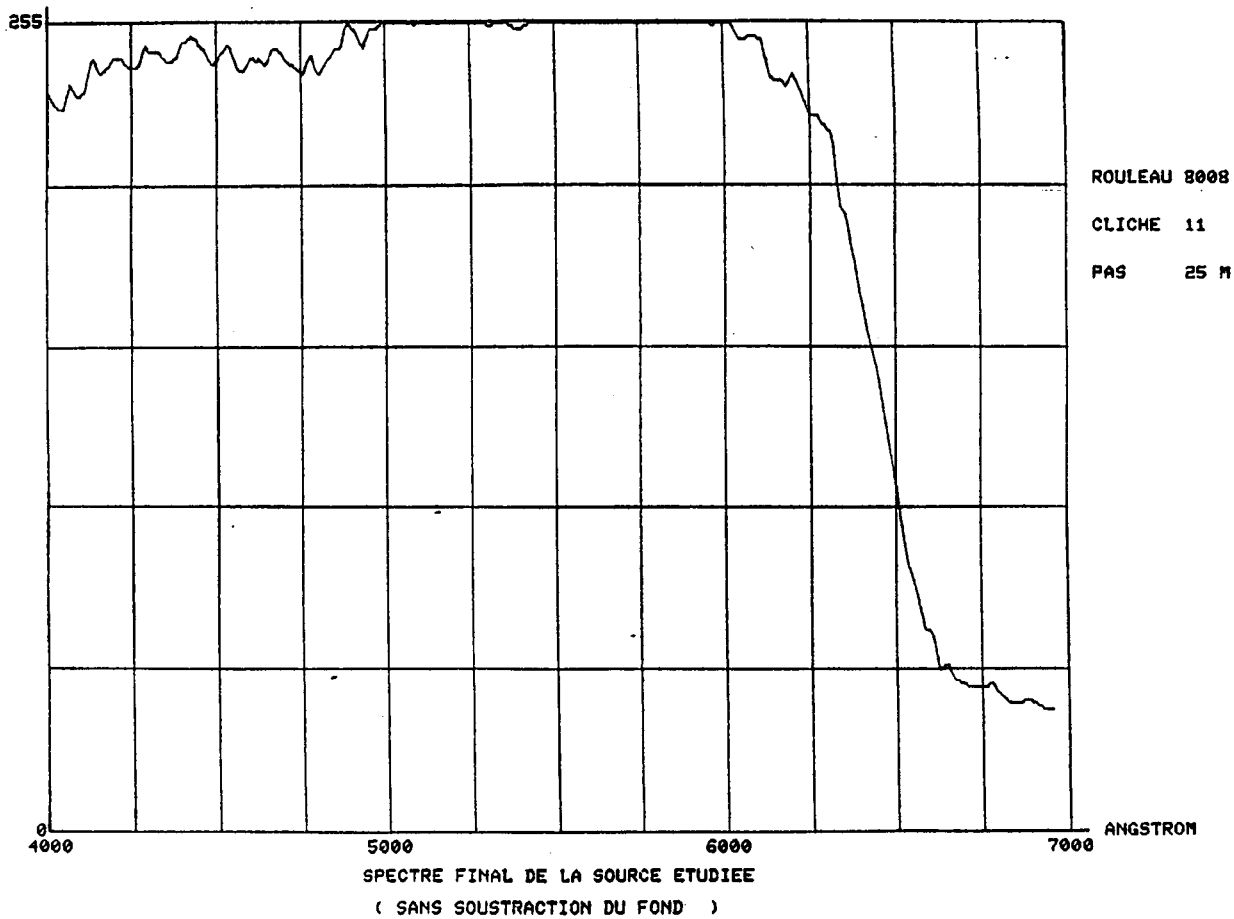
CLICHE 8008/11

Ampoule ordinaire, à 20m.

Spectre le long d'un ordre presque saturé.



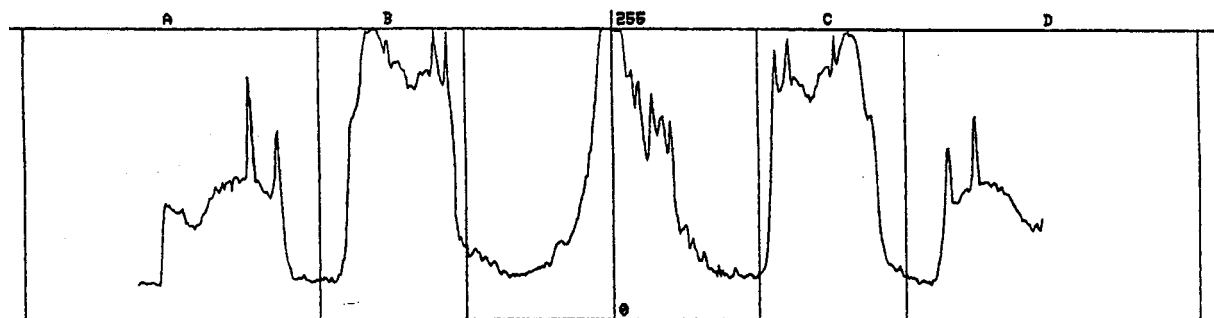
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -C



CLICHE 8008/12

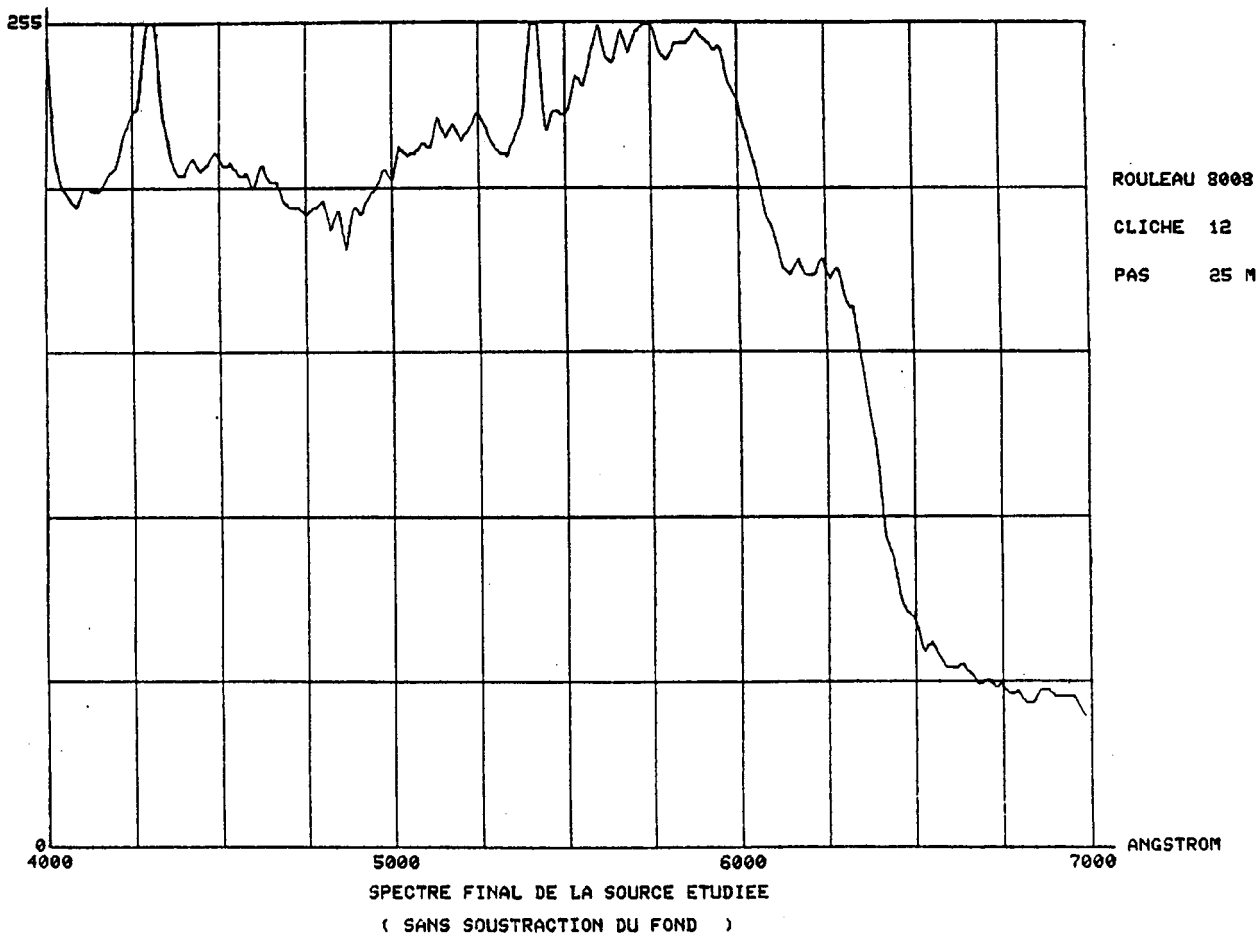
Tube au néon, à 20m.

Première extraction, sans soustraction du fond.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A, -C) : -C

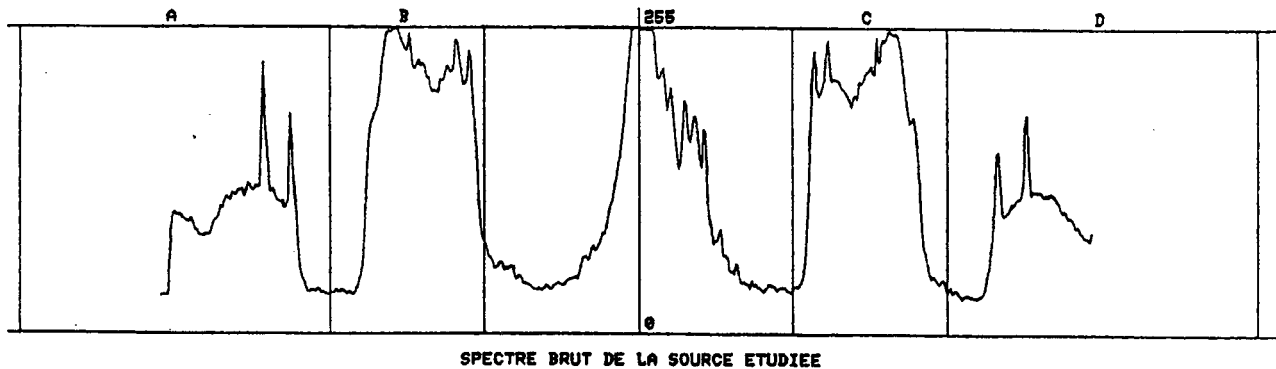


CLICHE 8008/12

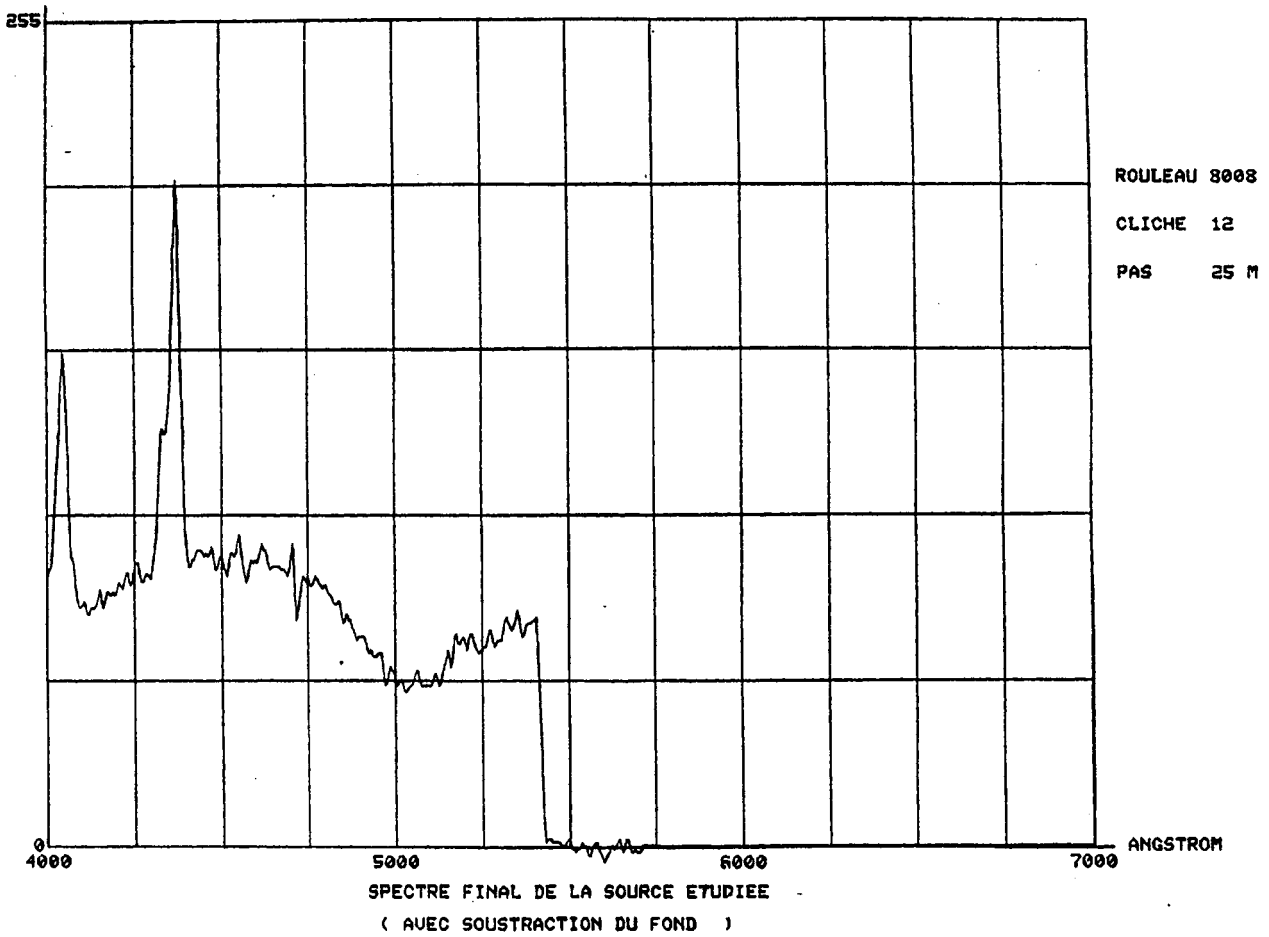
(voir page précédente)

Seconde extraction, avec soustraction du fond gênant.

Présence de deux raies de grande amplitude.



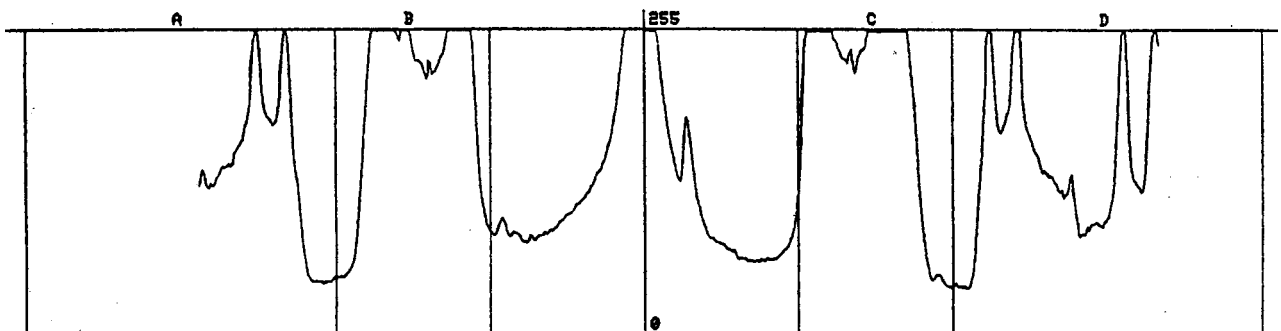
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) !.-A



CLICHE 8008/14

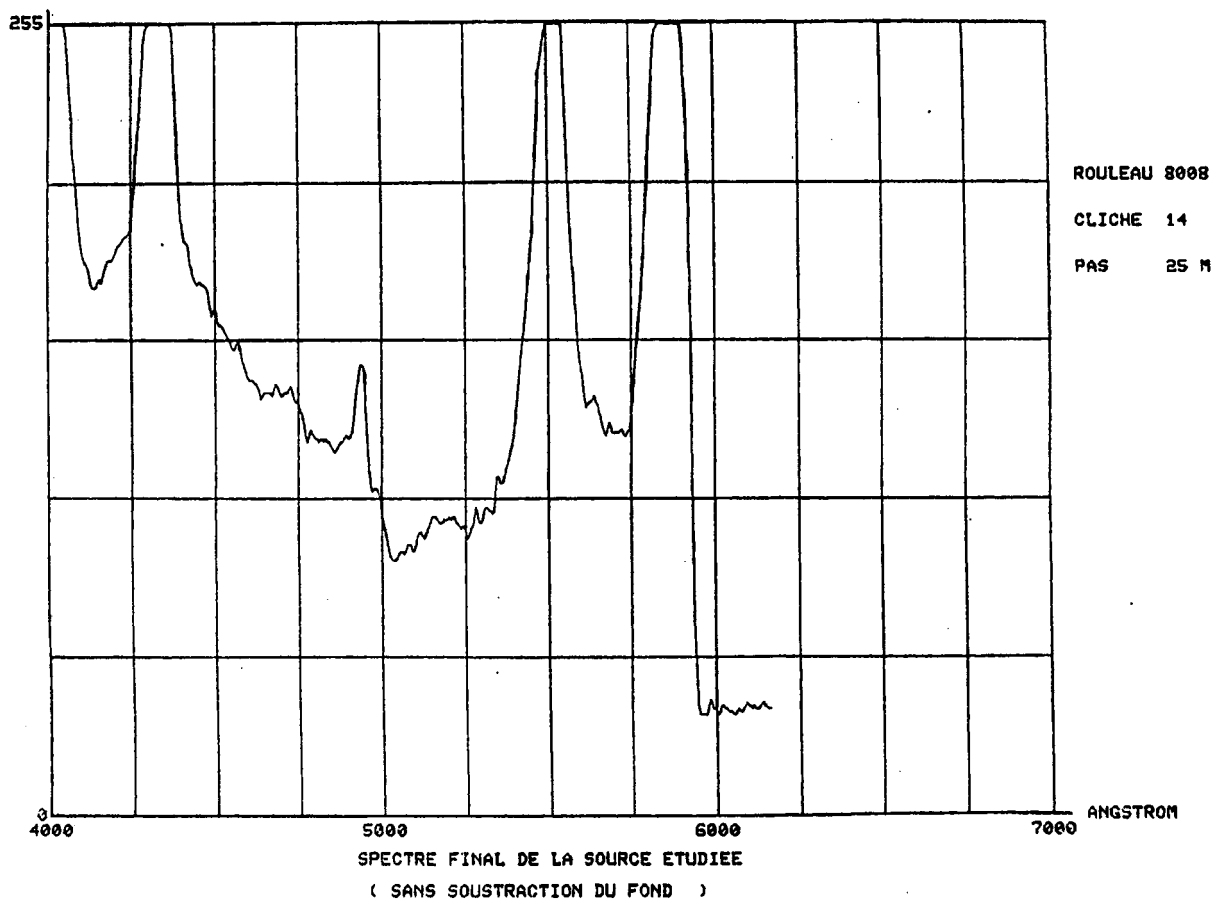
Réverbère de près (environ 10m).

Spectre de raies.



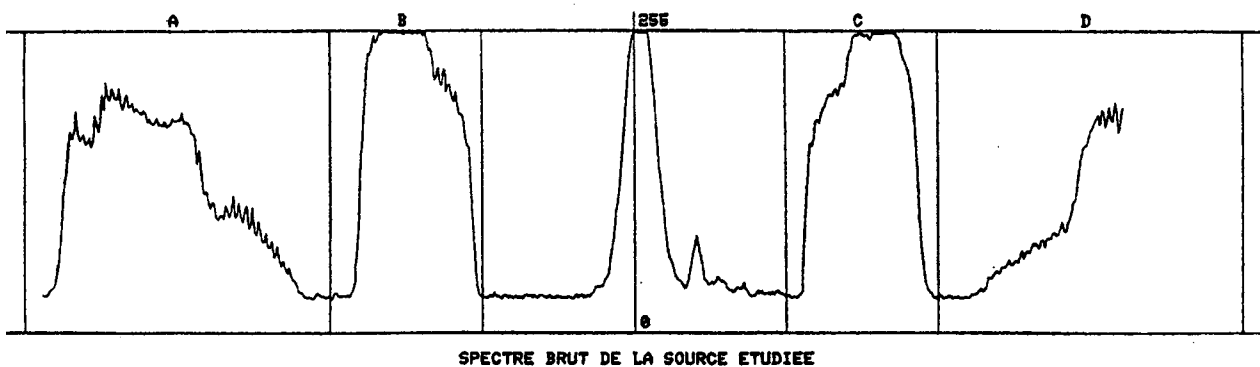
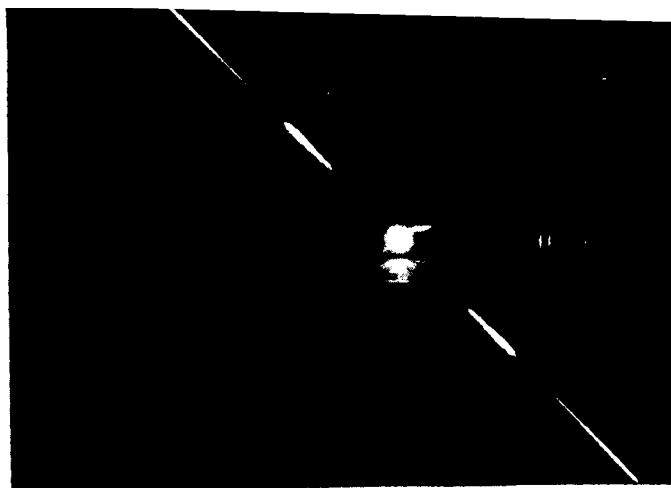
SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -D

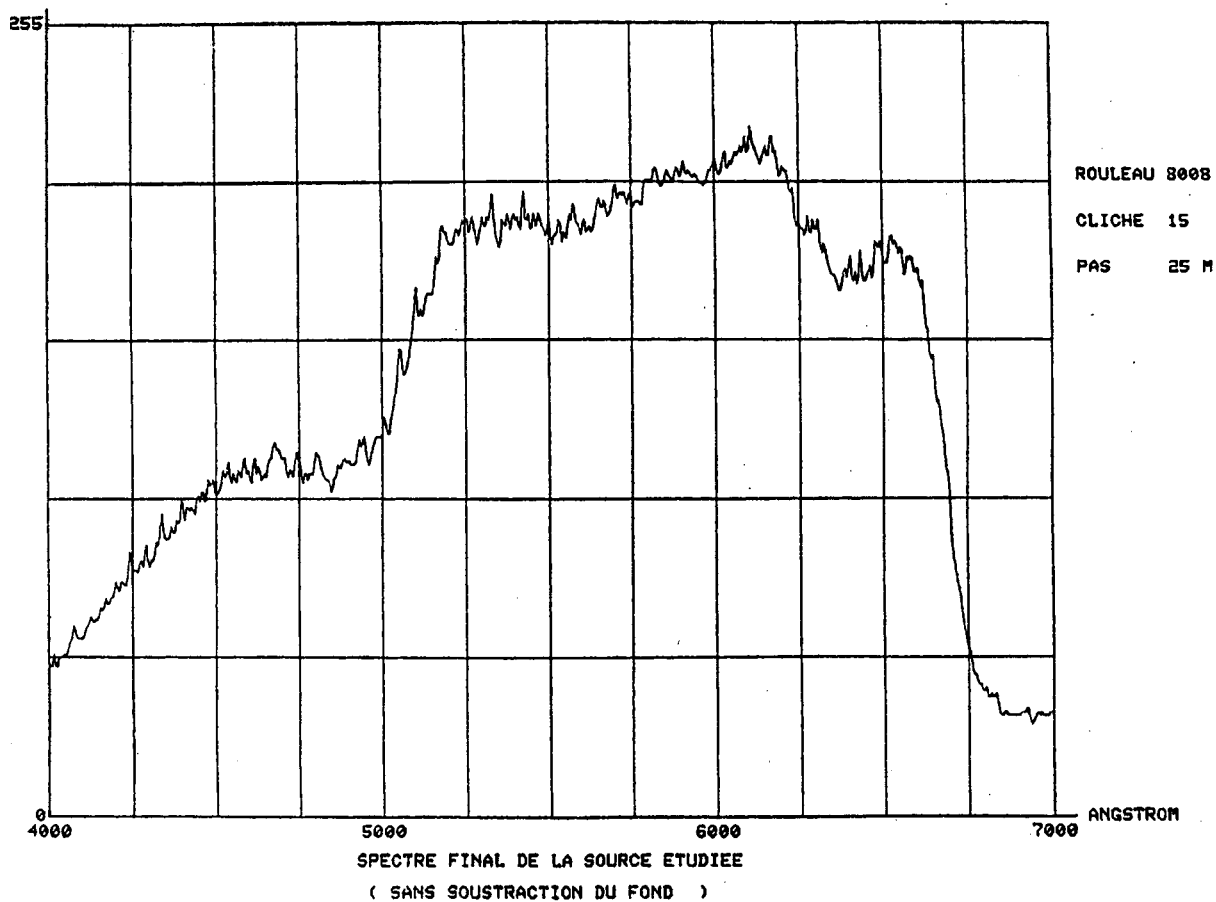


CLICHE 8008/15

Phare jaune de bicyclette, à 20m.



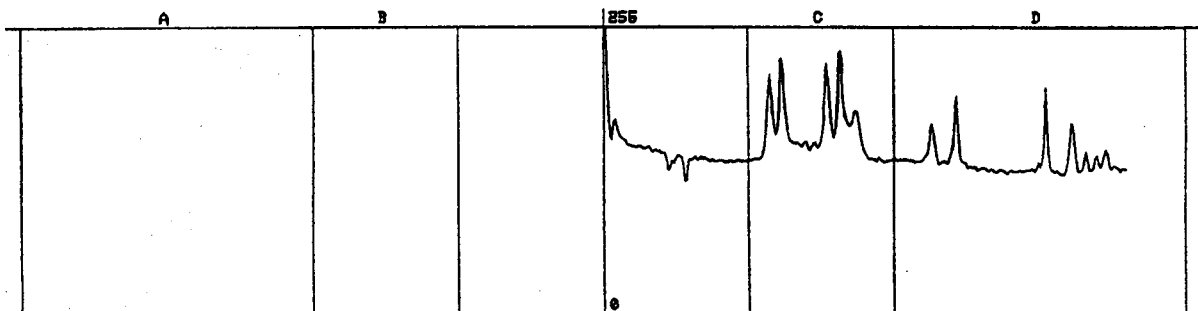
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) ! -A



CLICHE 8008/19

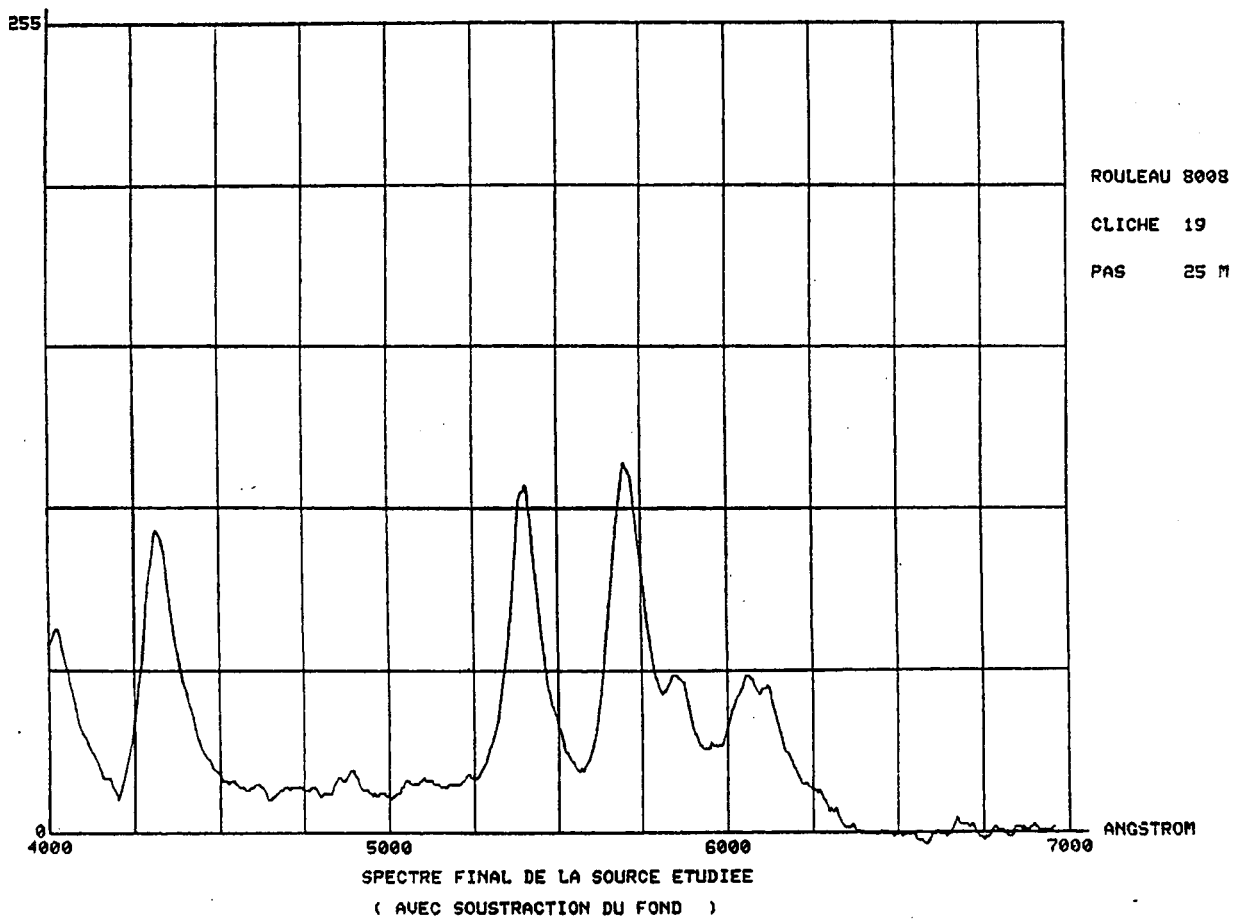
Réverbère à l'horizon (pose très longue).

Spectre de raies bien mises en évidence par la soustraction du fond.



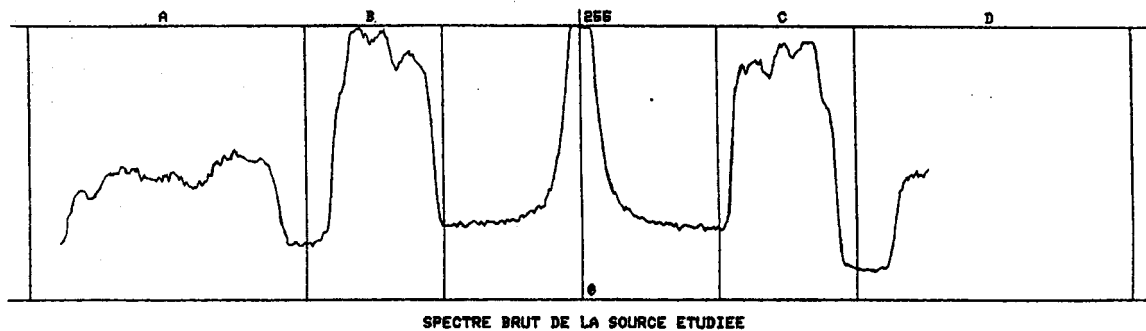
SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A, -C) : -C

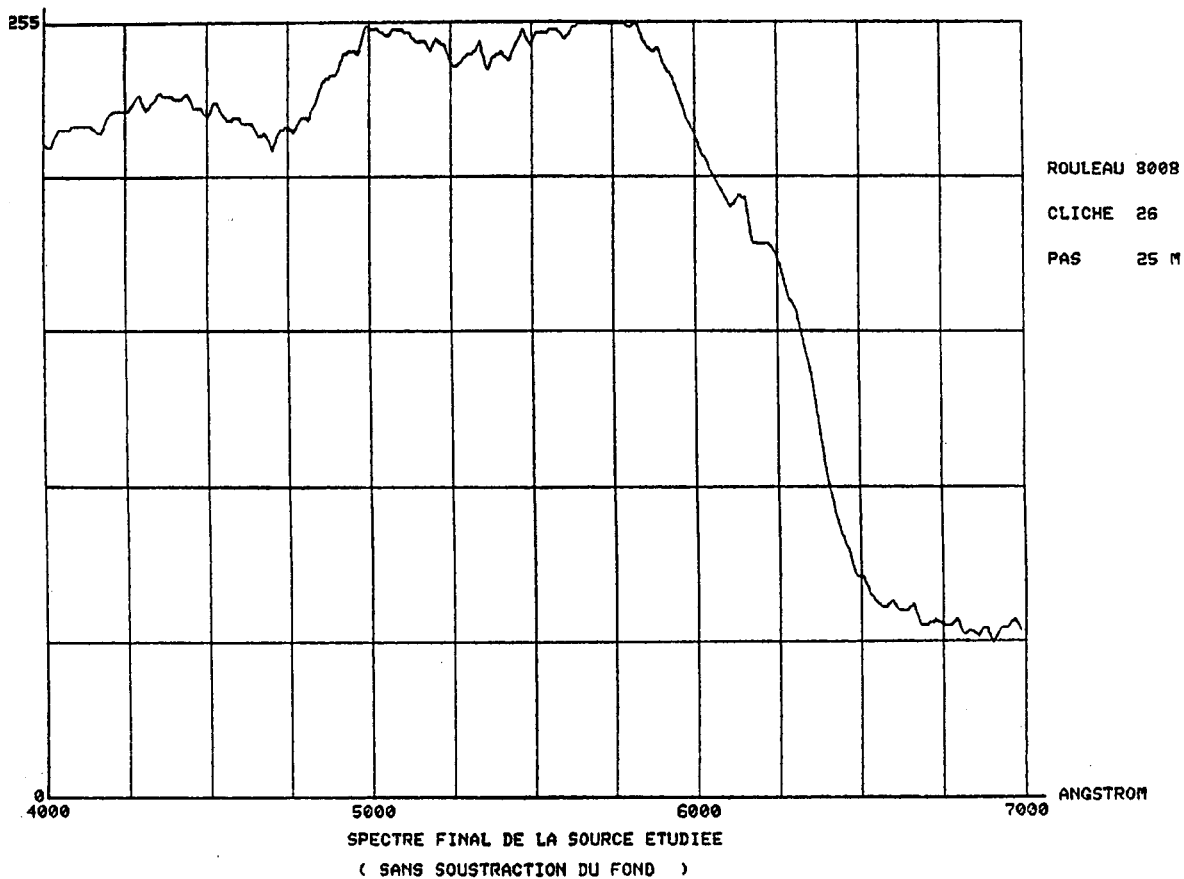


CLICHE 8008/26

Lune.



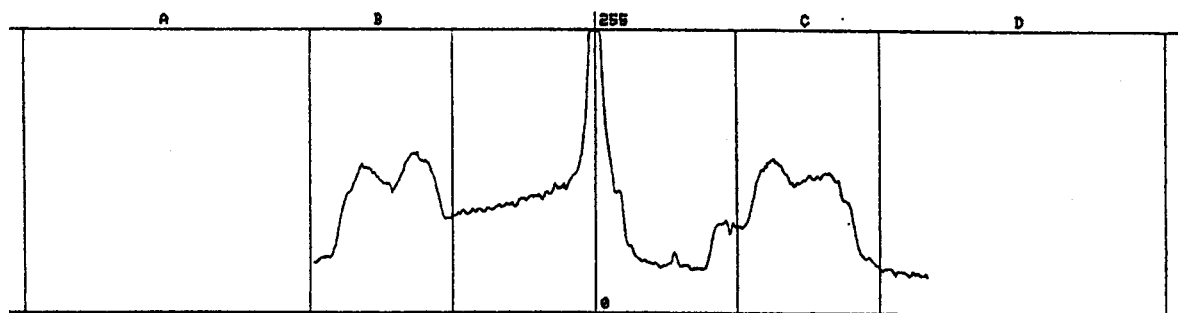
ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -B



CLICHE 8008/29

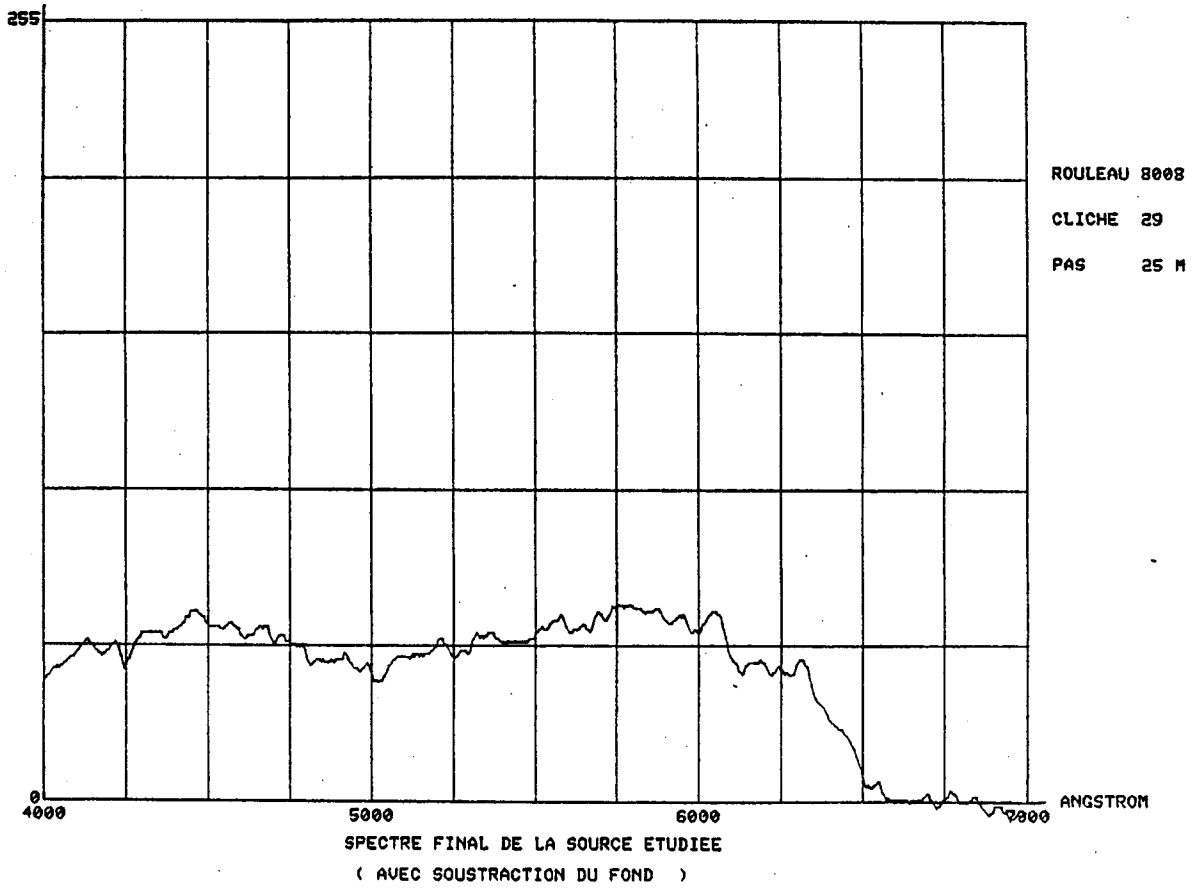
Refllet de la lune dans une vitre, à 1m.

Noter l'aplatissement du spectre par rapport au cliché précédent.



SPECTRE BRUT DE LA SOURCE ETUDIEE

ORDRE CHOISI ET SON SIGNE (EX: +A,-C) : -C



9 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES -

L'ensemble des procédures d'utilisation des réseaux de diffraction JOBIN-YVON par les gendarmes et d'exploitation des clichés est maintenant opérationnel. Ceci constitue un pas important dans la démarche active de recherche de données physiques sur les PAN, mais il convient de dresser un bilan critique de cette première version du système à la lumière de l'expérience acquise.

Les paragraphes qui suivent présentent les actions à entreprendre pour augmenter sensiblement les chances d'obtenir des données de haute qualité à l'aide de réseaux. On notera que la remise en question la plus importante concerne le "design" du réseau lui-même.

9.1. - LE SYSTEME INFORMATIQUE -

Au point de vue matériel, la configuration utilisée jusqu'à présent est proche de l'obsolescence et il est prévu de transposer l'ensemble des programmes existants sur des matériels plus modernes et nettement plus performants.

En ce qui concerne le logiciel, il est apparu que l'hypothèse d'une dispersion linéaire était très approximative, et qu'il faudrait étudier la possibilité d'affiner la calibration le long de l'axe de diffraction. En effet, on constate actuellement que selon que l'on utilise un ordre ± 1 ou un ordre ± 2 pour extraire un spectre, la position d'une raie donnée varie dans une fourchette de l'ordre de $\pm 100 \text{ \AA}$.

Un modèle du second degré en X pourrait par exemple être envisagé.

9.2. - LE RESEAU DE DIFFRACTION -

Le réseau JOBIN-YVON a de bonnes qualités optiques (il permet de distinguer à l'œil nu les deux raies du sodium, distantes de 12 \AA), mais il a le défaut d'être très fragile : le simple fait de le toucher du doigt ou de le nettoyer peut provoquer une dégradation notable de ses performances.

En outre, le problème majeur qui est apparu clairement au fil du développement et de la mise en oeuvre du système d'extraction réside dans son "design" lui-même : le fort pourcentage d'énergie transmise dans l'ordre 0 a pour effet que toute source lumineuse suffisamment intense pour fournir de l'information dans les ordres ± 1 ou ± 2 apparaît comme saturée dans l'ordre 0. Les conséquences ont déjà été exposées au § 5.3. : il est impossible de déconvoluer l'image des ordres supérieurs par celle de l'ordre 0, que ce soit en monodimensionnel dans l'axe de la diffraction ou en bidimensionnel, et les formes des spectres disponibles restent d'autant plus floues que la taille angulaire des sources est importante (voir le catalogue au chapitre précédent).

Si l'on veut pouvoir isoler des raies fines dans les spectres, il faut spécifier un nouveau réseau qui transmette beaucoup moins d'énergie dans l'ordre 0 (suffisamment quand même pour que l'on puisse reconnaître le paysage photographié) et en focalise davantage dans l'un des ordres supérieurs.

L'utilisation possible de techniques holographiques devrait être étudiée car elle résoudrait peut-être simultanément le problème de fragilité mécanique évoqué plus haut.

9.3. - ETUDES COMPLEMENTAIRES -

Il serait intéressant d'effectuer une évaluation statistique des dispersions des caractéristiques des composants la chaîne optique et en particulier du réseau de diffraction. Le résultat essentiel serait une connaissance plus précise et étayée des incertitudes de mesure des spectres.

Par ailleurs, indépendamment de l'étude d'un nouveau réseau évoquée précédemment, il serait utile d'appliquer la méthode d'extraction à d'autres composants photographiques. L'étude de divers films pourrait apporter des critères de choix vis-à-vis du problème de la détection des sources ténues (étoiles, planètes...). D'autre part, la mise en oeuvre d'un appareil photographique beaucoup plus performant que celui des gendarmes permettrait de voir dans quelle mesure le contrôle de tous les paramètres d'exposition (ouverture, temps de pose) permettrait de réaliser des mesures de flux absolus.

9.4. - COMMERCIALISATION -

A l'issue de cette étude, il faut souligner l'intérêt qu'il y aurait à susciter la prise en charge par un industriel de certains aspects de la production des réseaux (montage sur diverses bagues standard) et de la diffusion (publicité, information, vente aux particuliers...). En effet, la probabilité d'obtenir des spectres intéressants augmente avec le nombre de réseaux mis en circulation.

Indépendamment des critiques et suggestions exposées précédemment, "le système d'acquisition et d'analyse de spectres, tel qu'il est opérationnel à ce jour, est prêt à fournir des données précieuses et tout à fait nouvelles sur la nature de la lumière émise par les phénomènes photographiés par la Gendarmerie Nationale.

La phase suivante consistera donc à améliorer les performances de ce système original.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LE MAKROLON

ANNEXE 2 : LE FILM FP4

ANNEXE 3 : POUVOIR DE RÉOLUTION OU RESTITUTION DU CONTRASTE

ANNEXE 1 : LE MAKROLON

Propriétés optiques

La figure 7 représente la transparence du MAKROLON au rayonnement. Alors que les rayons UV sont absorbés presque totalement, la transparence atteint 85% environ dans le visible. Le transparence dépend fortement de la longueur d'onde au-delà de 1.500 nm (proche IR, IR). Il est ainsi possible d'utiliser un rayonnement IR de grande longueur d'onde pour chauffer des plaques de MAKROLON.

La figure 8 représente le coefficient de transmission spectrale de divers types incolores et blancs (épaisseur d'éprouvette : 3 mm). La figure 9 reproduit la variation du coefficient de transmission en fonction de l'épaisseur de plaque.

La MAKROLON a un indice de réfraction élevé $n_D \approx 1,586$.

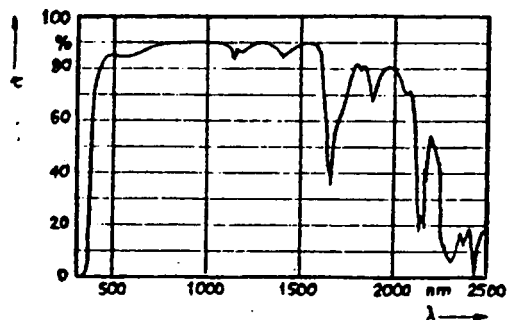


Figure 7 Coefficient de transmission τ du MAKROLON LS 55/012, d'une épaisseur de 3 mm, en fonction de la longueur d'onde λ

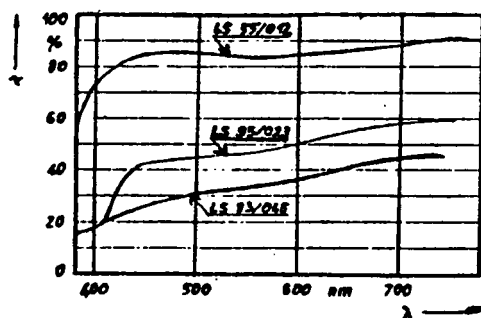


Figure 8 Coefficient de transmission τ de divers coloris de MAKROLON, en fonction de la longueur d'onde λ ; épaisseur de plaque 3 mm

ANNEXE 2

DOCUMENT TECHNIQUE.

FP4

FILM NOIR ET BLANC DE RAPIDITÉ MOYENNE 35mm

ILFORD

Description et utilisation

ILFORD FP4 est un film noir et blanc à grain ultra fin et de contraste moyen. En développement standard, sa rapidité nominale à la lumière du jour est de 125ASA/22DIN. Le film FP4 possède une émulsion à acutance élevée qui, jointe à sa finesse de grain et à sa latitude d'exposition, lui assure une qualité tout-à-fait exceptionnelle et en font le film idéal pour la prise de vue en intérieur comme à l'extérieur, particulièrement lorsqu'il s'agit de réaliser des agrandissements géants. FP4 donne des résultats de bonne qualité, même s'il est surexposé de six diaphragmes ou sous-exposé de deux diaphragmes.

Le film FP4 35mm a un support de teinte agréable, qui permet une évaluation aisée du contraste des épreuves au négatoscope. Il comporte également une numérotation des vues en chiffres gras, rendant très aisée l'identification des négatifs.

Utilisation des filtres

Les coefficients donnés ci-dessous constituent un guide pour le calcul de l'augmentation du temps de pose, rendue nécessaire lors de l'utilisation des filtres indiqués. Les coefficients pour la lumière du jour peuvent varier avec la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et avec l'heure de la journée. En fin d'après-midi ou pendant les mois d'hiver, lorsque la lumière est plus riche en radiations rouges, il peut être nécessaire d'augmenter légèrement les coefficients relatifs aux filtres verts et bleus. Les coefficients donnés pour l'éclairage au tungstène ont été établis pour une source de lumière au tungstène moyenne, d'une température de couleur de 2850°K. Les coefficients des filtres sont des facteurs d'intensité, mais pour la plupart des applications, les temps de pose peuvent être augmentés en utilisant soit un diaphragme plus ouvert, soit une vitesse d'obturation inférieure.

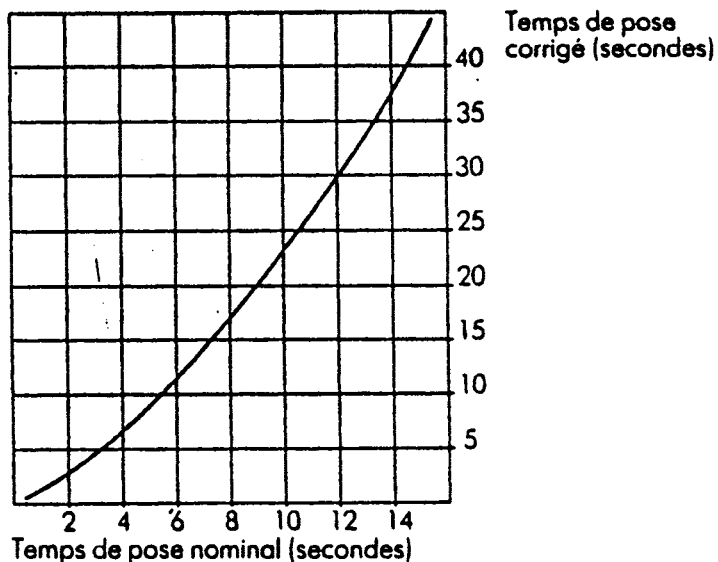
		Lumière du jour	Tungstène
104	Alpha (jaune)	1 1/2	1 1/4
109	Delta (jaune foncé)	2	1 1/2
202	Micro 5 (orange foncé)	5	2 1/4
402	Gamma (vert-jaune)	3 1/2	4
403	HW (bleu-vert)	—	3 1/2
204	Trichrome rouge	6	4
304	Trichrome bleu	7	13
404	Trichrome vert	6	6

3 Effets de réciprocité

FP4 ne nécessite pas de corrections du temps de pose en fonction de la loi de réciprocité, lorsque celui-ci se situe entre 0,5s et $1/1000$ de seconde. Les temps de pose supérieurs à 0,5s doivent être corrigés pour tenir compte de l'écart par rapport à cette loi de réciprocité.

Le graphique ci-dessous peut être utilisé pour déterminer les corrections à appliquer dans ce cas. Les valeurs portées sur l'axe horizontal indiquent les temps de pose estimés, l'axe vertical donnant les temps de pose corrigés.

3.1 Courbe de réciprocité



Pour les expositions extrêmement courtes, comme $1/10000$ de seconde, l'ouverture du diaphragme doit être augmentée d'une demi-division par rapport au réglage indiqué.

4 Eclairage de laboratoire

Le film FP4 doit être manipulé et traité dans l'obscurité complète. Une brève vérification de la densité du film peut cependant être effectuée de temps à autre au moyen d'une lanterne équipée d'un écran de sûreté ILFORD 908 (vert très foncé), pendant le traitement.

5 Technique d'exposition et de développement

Le film FP4 est idéal pour la plupart des utilisations. Tout en ayant une rapidité nominale standard de 125ASA/22DIN, il est d'une souplesse d'emploi qui permet de l'exposer et de le développer en fonction d'exigences très diverses. Le présent paragraphe résume du mieux possible la manière d'y parvenir.

5.1 Contraste à l'agrandissement

Il existe 2 catégories essentielles d'agrandisseurs, à condenseur ou à lumière diffuse. Les premiers donnant un contraste élevé et les seconds une image plus douce, il convient de déterminer le degré de contraste final du négatif avant de procéder au développement. Pour les négatifs devant être tirés dans un agrandisseur à condenseur sur un papier de grade moyen (par exemple ILFORD grades 2 ou 3) on recherchera un contraste «normal». Pour ceux destinés à être tirés dans un agrandisseur à lumière diffuse sur un papier de grade moyen, on recherchera un contraste «élevé». Les tableaux donnés plus loin indiquent les durées de développement de FP4 pour un contraste normal ou un contraste élevé.

Il faut attribuer au film traité pour être tiré dans un agrandisseur à lumière diffuse une rapidité nominale plus grande qu'à celui traité pour tirage dans un agrandisseur à condenseur (voir paragraphe 5.3).

5.2 Contraste du sujet

Ayant déterminé le degré de contraste requis pour le négatif à tirer, il est parfois nécessaire d'apporter des corrections au développement pour compenser un écart de brillance important du sujet. Ainsi, par soleil très vil, il peut être utile d'accroître l'ouverture du diaphragme d'une demi-division et de réduire le développement en conséquence. Ceci comprime légèrement la gamme de densités du négatif, en maintenant le niveau d'exposition. Par contre, lorsque l'écart de brillance du sujet est plutôt faible, il est souhaitable d'augmenter la durée du développement. Il n'est pas en général nécessaire de modifier l'exposition. Les courbes contraste/temps données plus loin, faciliteront le choix de la nouvelle durée de développement.

5.3 Rapidité du film

Le choix judicieux du révélateur ILFORD le mieux adapté permet d'exploiter la souplesse de FP4. Pour obtenir le meilleur résultat en utilisation courante, utiliser ILFORD ID-11. Pour obtenir un grain fin ou développer à bain perdu, utiliser ILFORD ILFOSOL 2. Pour avoir le grain le plus fin possible, mais avec une certaine perte de rapidité, développer FP4 dans ILFORD PERCEPTOL. Pour une augmentation de la rapidité, développer FP4 dans ILFORD MICROPHEN.

Le film FP4 peut aussi être développé en machine, sans perte de rapidité du film, avec le révélateur-régénérateur ILFORD ILFONEG.

Les réglages de posemètre recommandés pour chaque combinaison film-révélateur sont indiqués ci-dessous. Ceux-ci ont été déterminés au moyen de négatifs traités pour contraste normal et pour contraste élevé.

	PERCEPTOL	ILFOSOL 2	ID-11	MICROPHEN	ILFONEG
Contraste normal					
ASA	64	125	125	200	125
DIN	19	22	22	24	22
Contraste élevé					
ASA	100	160	200	320	200
DIN	21	23	24	26	24

Bien que les valeurs ASA/DIN recommandés ci-dessus soient valables pour l'exposition en lumière du jour, elles constituent une première indication pour la prise de vues en lumière artificielle.

6 Développement

Le tableau ci-dessous donne les durées de développement en minutes pour le traitement à 20°C dans une cuve à spirales, avec agitation continue pendant les 10 premières secondes du développement, suivie de 10 secondes d'agitation (ou 4 renversements) toutes les minutes pendant le reste du traitement.

	Contraste normal*	Contraste élevé*
PERCEPTOL	10	13
ID-11	6½	10
MICROPHEN	5	7½

* Contraste «normal» et contraste «élevé» s'entendent respectivement pour le contraste d'un négatif destiné au tirage dans des agrandisseurs à condenseur et à lumière diffuse.

Dans le cas d'une agitation continue, comme celle utilisée pour le traitement en cuvette ou dans certains types de cuve, il convient de réduire ces durées d'un tiers.

- 6.1 Développement en révélateur dilué ou à bain perdu
Le développement de FP4 dans les révélateurs ID-11, MICROPHEN ou PERCEPTOL dilués accroît l'acutance déjà élevée de ce film. Le développement en bain dilué convient tout spécialement pour les sujets présentant des écarts de brillance importants. On obtient alors des images brillantes, sans qu'il y ait perte de détails dans les ombres et les hautes lumières. Le révélateur dilué ne doit servir qu'une fois puis être jeté.

Le tableau ci-dessous donne les durées de développement en minutes à 20°C dans le cas d'une agitation intermittente.

	Dilution	Contraste normal	Contraste élevé
PERCEPTOL*	1+1	11	15
	1+3	16	28
ILFOSOL 2	1+9	4	6 1/2
ID-11	1+1	9	14
	1+3	15	22
MICROPHEN	1+1	8	13
	1+3	11	20

* Lorsqu'on passe du traitement en solution standard au traitement à bain perdu avec le révélateur PERCEPTOL, il convient d'utiliser une rapidité de film de 100ASA/21DIN pour le contraste normal des négatifs, et de 125ASA/22DIN pour le contraste élevé. Avec les révélateurs ID-11 et MICROPHEN, la rapidité du film FP4 reste la même, quelle que soit la technique de développement recommandée.

7 Fixage

Après développement, le film doit être rincé à l'eau puis fixé dans un fixateur acide comme ILFORD HYPAM, l'opération s'effectuant en 2 à 4 minutes. Si un agent tannant est nécessaire, ajouter ILFORD RAPID HARDENER, le tannage correct étant obtenu en 4 minutes. On peut également utiliser ILFOFIX, fixateur acide, qui fixe et tanne le film en 10 à 20 minutes.

8 Lavage

La durée de lavage dépend principalement de la présence ou de l'absence de tannage lors du fixage.

Lorsque les films ont été traités avec un fixateur tannant, il convient de les laver soigneusement à l'eau courante pendant 15 à 20 minutes.

S'il n'y a pas eu de tannage et si la température de traitement est inférieure à 25°C, on peut appliquer une autre méthode de lavage qui, tout en permettant des économies de temps et d'eau, donne un lavage permanent convenant à la mise en archives.

- 1 Traiter le film dans une cuve à spirales.
- 2 Le fixer au moyen d'un fixateur non tannant comme ILFORD HYPAM.
- 3 Après fixation, remplir la cuve d'eau à la même température que les solutions de traitement et la retourner cinq fois.
- 4 Vider la cuve et la remplir d'eau à nouveau. La retourner dix fois.
- 5 Vider la cuve, la remplir d'eau une troisième fois et la retourner vingt fois. Un rinçage final à l'eau additionnée d'agent mouillant ILFORD ILFOTOL aidera à obtenir un séchage rapide et uniforme du film. Celui-ci devra ensuite être séché dans un endroit exempt de poussières.

9 Traitement en machine

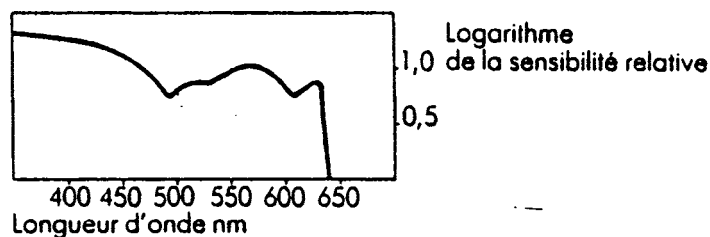
Le film FP4 peut être traité dans toutes les machines automatiques à usage général. Le révélateur-régénérateur ILFORD ILFONEG est recommandé pour cet usage. Le tableau ci-dessous donne les durées de développement automatique à 30°C, en secondes.

	Contraste normal	Contraste élevé
ILFONEG	30	50

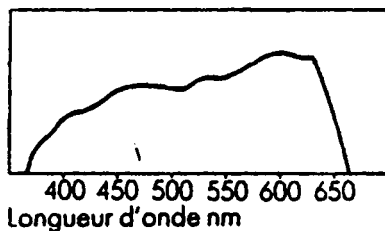
Après développement, fixer FP4 dans ILFORD HYPAM (1+4) additionné de tannant ILFORD RAPID HARDENER. L'emploi d'un tannant est indispensable pour le traitement en machine.

10 Sensibilité spectrale

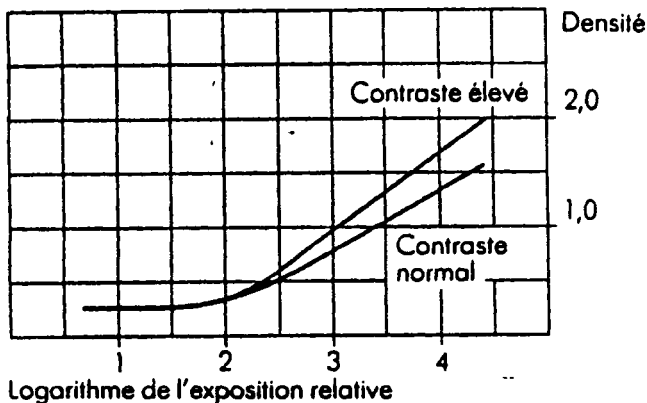
10.1 Courbe de radiance uniforme



10.2 Spectrogramme sous coin neutre en lumière tungstène (2850°K)



11 Courbes caractéristiques

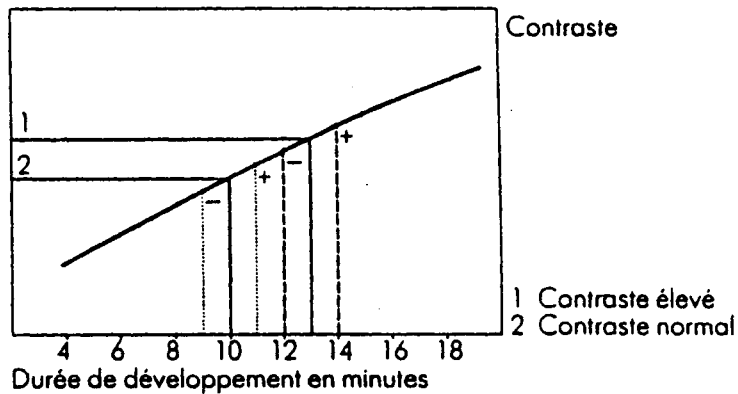


FP4 développé dans ID-11 à 20°C avec agitation intermittente

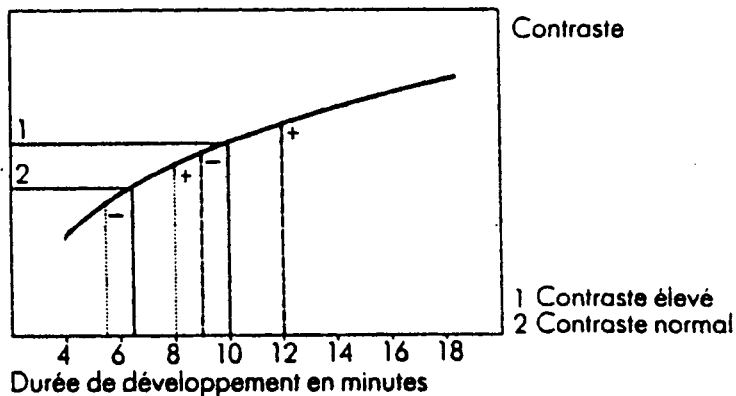
12 Courbes contraste/temps

Les courbes données ci-après indiquent les temps de développement pour un « contraste normal » et pour un « contraste élevé », et offrent, en outre, des temps permettant de compenser les divers écarts de brillance du sujet. Les durées indiquées par les courbes «-» peuvent être utilisées pour les sujets dont les écarts de brillance sont importants. A l'opposé, les durées plus grandes indiquées par les courbes «+» peuvent être employées lorsque les écarts de brillance du sujet sont faibles. Ces temps sont donnés à titre indicatif, car il est admis que certains facteurs peuvent imposer de plus grandes modifications de la durée de développement.

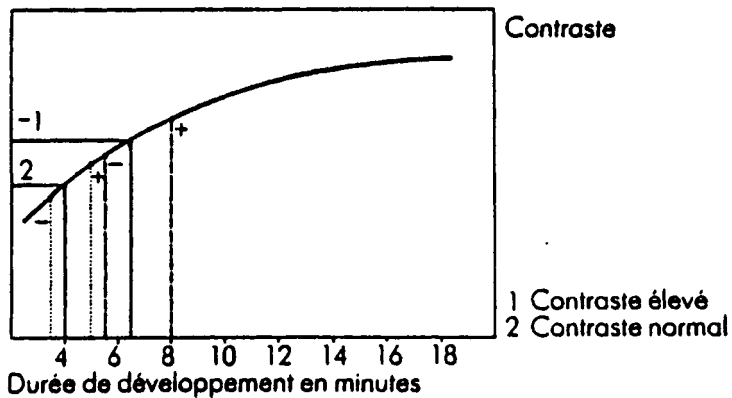
12.1 PERCEPTOL



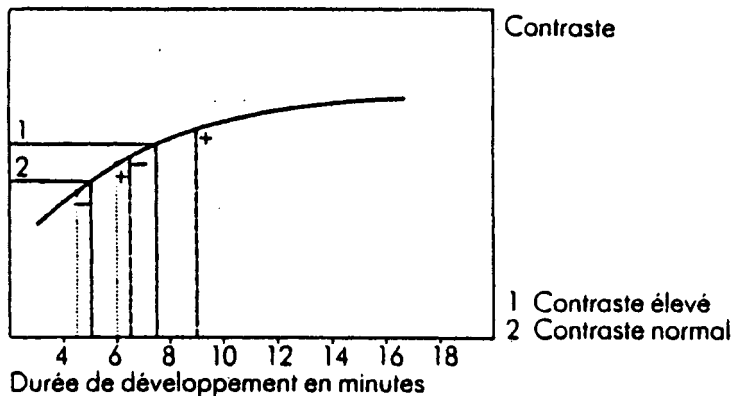
12.2 ID-11



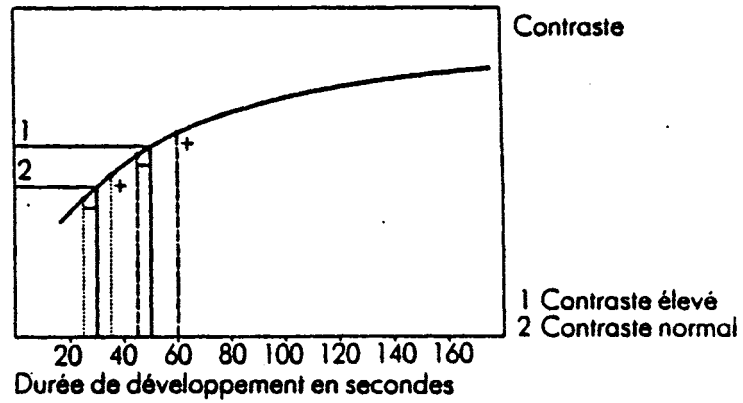
12.3 ILFOSOL 2 (1+9)



12.4 MICROPHEN



12.5 ILFONEG



ILFORD
ID 11

DOCUMENT TECHNIQUE

— Révélateur, régénérateur

Description

ID 11 est un révélateur grain fin du type Génol-Hydroquinone-Borax (M. Q. Borax) qui donne d'excellents résultats avec tous les films, sans perte de sensibilité générale.

Applications

ID 11 convient parfaitement dans tous les cas de photographie classique. Il s'emploie aussi bien avec ou sans régénération.

Caractéristiques

- Grain fin
- Développement progressif
- Souplesse d'utilisation
- Exceptionnelle résistance à l'oxydation et à l'épuisement.

ID 11 permet d'obtenir des clichés dont la granulation très fine donne des images agrandies de haute qualité. On constate avec le révélateur ID 11 une évolution très régulière du contraste en fonction du temps de développement (voir courbe contraste/temps).

Cette caractéristique associée à une bonne souplesse d'utilisation rend l'emploi du révélateur ID 11 facilement contrôlable.

Le révélateur ID 11 se conserve très bien grâce à son excellente résistance à l'oxydation et à l'épuisement.

Préparation du bain

Ne pas essayer de préparer des doses inférieures à celle prévue en fractionnant les produits en poudre. La dose doit donc être préparée en une seule fois. Les doses de révélateur ID 11 comprennent trois sachets. Dissoudre le contenu des deux plus petits sachets A et B dans environ 3/4 du volume total d'eau chaude (40° C) et ajouter progressivement le contenu du sachet C en agitant jusqu'à complète dissolution.

Compléter avec de l'eau froide pour obtenir le volume indiqué de solution prête à l'emploi.

Capacité de développement (sans régénération)

Si le révélateur ID 11 est stocké en bouteille fermée hermétiquement, il peut être utilisé en plusieurs fois. Dans des conditions normales, on développe 9 Roll-films 120 par litre de bain

Tableau d'équivalence en surface

1 Roll-film 120 = 1 Film 135 - 36 poses

1 Film 135 - 36 poses = 2 Films 135 - 20 poses

Pour obtenir un contraste constant, il est nécessaire d'augmenter le temps de développement de 10 % après chaque groupe de 8 films traités par 4,5 l. de révélateur.

Dans le cas de volumes de bain supérieurs, réaliser proportionnellement cette augmentation de temps.

Exemple : pour 22,5 l de révélateur, augmenter de 10 % après chaque groupe de 40 films traités.

Régénération

Le régénérateur ID 11 est étudié pour maintenir une activité constante du révélateur dans le cas d'un emploi en cuve de grande contenance.

Préparation du régénérateur :

Le régénérateur ID 11 est composé de trois sachets.

Dissoudre le contenu du sachet A et ensuite le sachet B dans environ 1700 cc d'eau chaude (40°).

Ajouter le contenu du sachet C et agiter jusqu'à dissolution complète.

Compléter avec de l'eau froide pour obtenir 2,5 l. de solution prête à l'emploi.

Mode d'emploi

Le régénérateur remplace le révélateur transporté par les films en sortie de développement de façon à maintenir constant le volume du bain, l'activité du révélateur et le temps de développement.

Nous conseillons de bien égoutter les films au-dessus de la cuve de révélateur afin de transporter le minimum de bain, ce qui permet d'éviter de plus une usure prématurée des bains suivants (bain d'arrêt, fixateur). Il y a lieu de régénérer quand le volume du bain a diminué de 5 % ou quand il a été développé environ 1,3 m² par volume de 4,5 l. de bain.

Ce qui donne un apport de 150 cc de régénération par m² (20 Roll-films = 1 m²) de film traité.

La régénération peut être continuée très longtemps.

Le révélateur doit être changé quand le film montre une légère opalescence après fixage.

Temps de développement

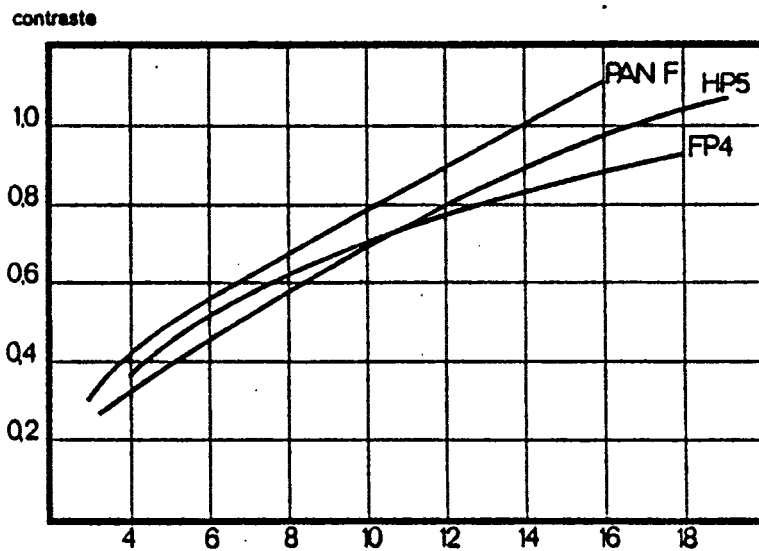
Dans la plupart des cas, les films doivent être développés à un contraste normal si on emploie un agrandisseur à lumière tungstène, et à un contraste plus élevé si on emploie un agrandisseur à lumière froide.

Ces valeurs de contraste sont indiquées pour permettre un tirage sur papier ILFOBROM Grade 2.

Les temps de développement ci-après sont donnés pour un traitement à une température de 20° C avec agitation intermittente (agitation pendant les 10 premières secondes et 5 secondes toutes les minutes).

Ces temps de développement sont donnés à titre indicatif. Ils peuvent être modifiés en fonction des différentes méthodes de développement utilisées et des conditions de prise de vue.

	contraste normal	Contraste élevé
PAN F	6 mn	8 1/2 mn
FP 4	6 1/2 mn	10 mn
HP 4	8 mn	10 mn
HP 5	7 1/2 mn	10 mn



Courbe contraste/temps développement en cuve
Agitation intermittente - Traitement à 20 °C

DEVELOPPEMENT en ID 11 dilué :

La dilution du révélateur ID 11 offre de nombreux avantages :

- augmentation de la définition
- meilleur contrôle du contraste
- résultat absolument régulier, usage "une fois"
- pas de perte de rapidité

Les dilutions recommandées pour ID 11 sont 1 + 1 ou 1 + 3 - Une dilution supérieure à 1 + 3 n'augmente pas la qualité des clichés.

Une fois dilué, le révélateur ne peut pas être conservé après un premier développement.

Temps de développement à 20°.

Agitation intermittente.

	Dilution	Contraste normal	Contraste élevé
PAN F	1 + 1	8 1/2 mn	12 mn
	1 + 3	12 1/2 mn	18 mn
FP 4	1 + 1	9 mn	14 mn
	1 + 3	15 mn	22 mn
HP 4	1 + 1	12 mn	18 mn
	1 + 3	20 mn	.
HP 5	1 + 1	12 mn	18 mn
	1 + 3	21 mn	.

* Déconseillé.

Conditionnements

Le révélateur est disponible en dose de :

5 × 0,6 litres

2,5 litres

10 litres

et le régénérateur en dose de :

2,5 litres

Important

Ce produit contient certaines substances qui peuvent provoquer des irritations de la peau pour certaines personnes.

Il est donc recommandé de bien se rincer les mains et de les sécher aussitôt que possible après avoir manipulé du révélateur ID 11.

ILFORD décline toute responsabilité pour d'éventuelles conséquences dues à l'emploi de ce révélateur.

Abaque temps/température de développement

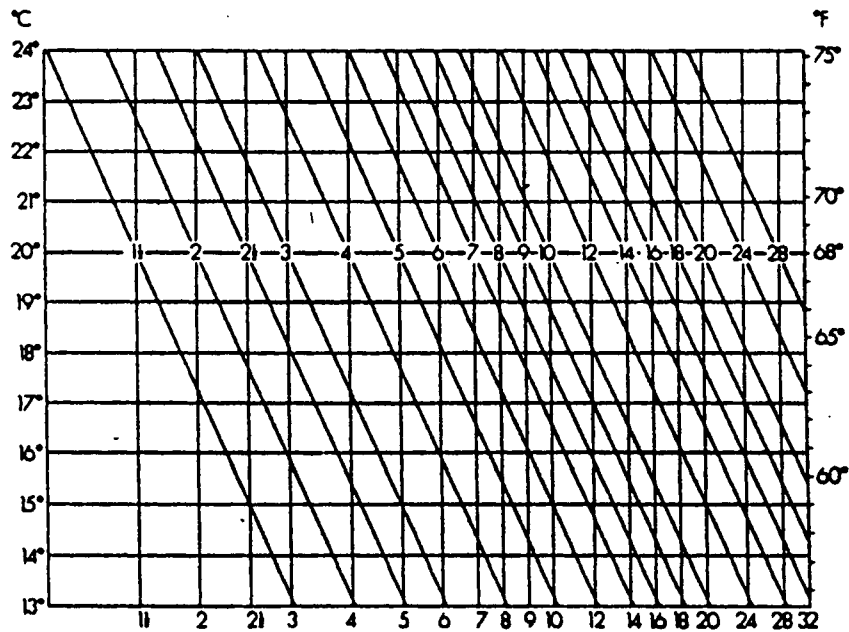
Cet abaque est destiné à déterminer le temps de développement à différentes températures lorsque l'on connaît le temps recommandé à 20° C.

Pour utiliser l'abaque, choisir la ligne verticale correspondant au temps de développement à 20° C. Cette ligne coupe sur la droite horizontale de 20° C une oblique en trait fort; l'intersection de cette oblique avec la ligne température à utiliser détermine le temps de développement à appliquer.

Exemple :

Temps de développement de base : 8 mn à 20° C.

A 23°C, il faudra développer 6 minutes seulement.



LUMIÈRE SA
Chemin de la Fouillouse
F 69800 SAINT PRIEST

LUMIÈRE SA
59, rue C. Delescluze
F-93170 BAGNOLET

ILFORD SA
CH-1700 FRIBOURG 5
Pérolles 55

SA ILFORD NV
178-184, rue de la Cambre
B-1200 BRUXELLES

ILFORD Ltd
BASILDON Essex
SS 14 3ET England

5000 EX. FEV. 78

ANNEXE 3**POUVOIR DE RÉOLUTION
OU
RESTITUTION DU CONTRASTE**

par Jacques **POULEAU**
Division Optique Matra

I. - INTRODUCTION

Depuis des dizaines d'années, on a l'habitude de juger de la qualité d'un système optique par la mesure de la « résolution maximum ». Au fabricant d'objectifs, on demande toujours quel est le pouvoir résolvant de ses objectifs ce qui laisse supposer dans l'esprit de tous que cela représente un critère de qualité.

Certes le pouvoir de résolution fournit une information non négligeable mais elle est bien incomplète. De plus c'est une méthode subjective c'est-à-dire qu'elle est basée sur un critère qui dépend de la manière dont l'observateur apprécie ou non les faibles contrastes.

Il y a quelques années, des chercheurs ont imaginé une nouvelle méthode d'évaluation des systèmes optiques (appelée Fonction de Transfert Optique). Cette méthode, découlant du fait qu'un système optique a l'aptitude d'effectuer simplement une transformation mathématique complexe, tend à se généraliser. En particulier, dans tous les pays du monde les calculateurs d'objectifs et les fabricants utilisent cette méthode pour l'évaluation de leurs prototypes. Des standards commencent à être proposés et petit à petit on utilisera la fonction de transfert comme moyen de contrôle de production.

Pour mieux comprendre ce qui va suivre, nous pensons qu'il est souhaitable de montrer l'analogie qui existe entre l'objectif photographique (transmission des images) et la chaîne électro-acoustique (transmission des sons).

courbe de transmission sera uniforme (atténuation identique pour toutes les fréquences transmises) et que sa bande passante sera large (domaine couvert depuis les basses fréquences — graves — jusqu'aux hautes fréquences — aigus). Il ne viendrait à l'idée d'aucun professionnel, voire même d'un amateur d'acquérir une chaîne électro-acoustique sans connaître sa courbe de transmission des fréquences.

La connaissance de cette courbe sera nécessaire pour optimiser au mieux l'ensemble de traitement de l'information allant de la prise de son jusqu'à la restitution. En particulier, des filtres compensateurs pourront améliorer la qualité globale en corrigeant les variations du facteur de transmission.

Une méthode simple et connue pour la détermination de la courbe de transmission consiste à introduire comme signal d'entrée, une sinusoïde de fréquence f (exprimée en hertz, nombre de vibrations sinusoidales par seconde) et d'amplitude « a » et de mesurer à la sortie de la chaîne l'amplitude « a' » transmise; le rapport $\frac{a'}{a}$ donne le coefficient de transmission pour la fréquence f . En faisant varier d'une manière discrète la fréquence, il est possible de connaître, point par point, la courbe de transmission.

C'est ce qu'on appelle la Fonction de Transfert.

Comment ces notions, bien assimilées par les mélomanes, peuvent-elles être transposées aux professionnels et amateurs de la photographie?

**II. - TRANSMISSION
DES INFORMATIONS****II.1. Transmission des sons**

Une chaîne électro-acoustique est un filtre de fréquences temporelles c'est-à-dire qu'elle transmet les sons en les atténuant plus ou moins et sera jugée d'autant meilleure que sa

II.2. Transmission des images

On s'est intéressé à l'étude de la transmission de l'image d'un objet complexe et l'on s'est aperçu que l'instrument d'optique se comporte comme un filtre à l'égard des différentes composantes sinusoidales présentes dans l'objet. De même qu'un son peut être décomposé en une infinité de composantes sinusoidales par rapport au temps (fréquence temporelle) un

objet optique peut être représenté par l'ensemble d'une infinité de composantes sinusoidales dans le plan objet. On a affaire à des composantes présentant différentes fréquences spatiales (nombre de traits ou de cycles par millimètre) et l'instrument d'optique présente, pour chacune d'elles, un facteur de transmission qui dépend de cette fréquence spatiale.

Prenons un exemple : soit une mire à créneaux, c'est-à-dire une mire constituée par la juxtaposition de traits blancs et noirs d'égale largeur. C'est un objet simple et connu des photographes mais complexe du point de vue mathématique.

Si « p » est le pas de la mire exprimé en millimètres, sa fréquence fondamentale est :

$$\mu_{mm} = \frac{1}{p_{mm}}$$

Du point de vue mathématique, la mire à créneaux s'exprime par sa décomposition en série de Fourier, c'est-à-dire en composantes sinusoidales, par une expression de la forme :

$$\frac{4}{\pi} \left(\sin \mu + \frac{1}{3} \sin 3 \mu + \frac{1}{5} \sin 5 \mu + \dots + \frac{1}{n} \sin n \mu \right)$$

Pour que l'image de cette mire à créneaux formée par l'objectif soit conforme à l'objet, il est nécessaire que les différentes fréquences qui la composent soient toutes transmises et ceci sans atténuation. Ce qui n'est jamais le cas puisque l'objectif est un filtre de fréquences.

Que va-t-il se passer ?

a) Tout d'abord l'objectif étant un filtre de fréquences spatiales, toutes les fréquences ne seront pas transmises puisque l'objectif ne transmet pas au-delà de sa fréquence de coupure (μ_c). Par conséquent, dans le meilleur cas, la mire à créneaux image, aura un développement en série limité à la fréquence de coupure c'est-à-dire, de la forme :

$$\frac{4}{\pi} \left[\sin \mu + \frac{1}{3} \sin 3 \mu + \frac{1}{5} \sin 5 \mu + \dots + \frac{1}{n} \sin n \mu \right]$$

avec $n \mu \leq \mu_c$

b) Ensuite, et c'est plus grave, les différentes fréquences transmises par l'objectif subissent des atténuations différentes pour chaque fréquence puisque l'objectif n'a pas une courbe de transmission uniforme et en réalité l'image de la mire à créneaux sera représentée par un développement en série de la forme :

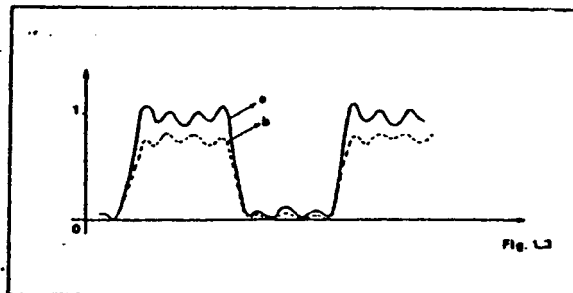
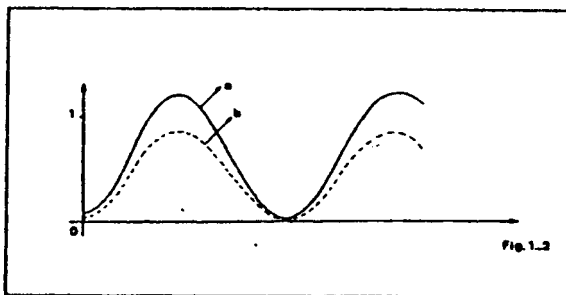
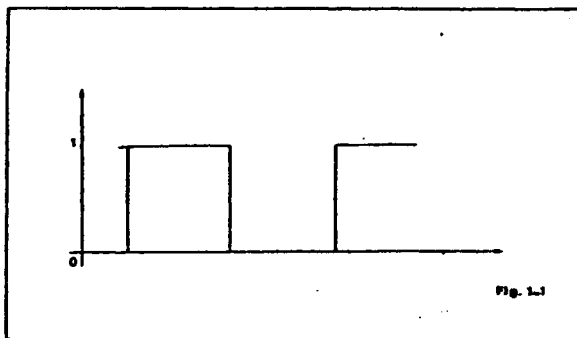
$$\frac{4}{\pi} \left[k_1 \sin \mu + k_3 \frac{1}{3} \sin 3 \mu + k_5 \frac{1}{5} \sin 5 \mu + \dots + k_n \frac{1}{n} \sin n \mu \right]$$

On voit alors, par comparaison avec l'expression mathématique de la mire à créneaux-objet, que son image aura un aspect différent puisque chacune des composantes sera transmise avec un coefficient k variable en fonction de la fréquence spatiale.

La remarque « a » introduit la notion « de pouvoir séparateur » de l'objectif, la remarque « b » celle de transfert de contraste. Ce qui en d'autres termes, peut être exprimé par : « les hautes fréquences donnent les détails et les basses fréquences le contraste ».

Reprenons l'exemple de la mire à créneaux :

La fig. 1-1 représente la répartition de luminance d'une mire à créneaux en fonction de l'espace.



La fig. 1-2 représente :

- a) l'image que donnerait un objectif dont la fréquence de coupure serait inférieure à 3 μ ;
- b) ce que donne réellement comme image un objectif dont la fréquence de coupure est inférieure à 3 μ et dont l'atténuation pour la fréquence μ est k.

La fig. 1-3 représente :

- a) l'image que donnerait un objectif dont la fréquence de coupure serait inférieure à 7 μ ;
- b) ce que donne réellement comme image un objectif dont la fréquence de coupure est inférieure à 7 μ et dont l'atténuation pour les fréquences μ , 3 μ et 5 μ est de k_1 , k_3 et k_5 . Le contraste est plus faible.

On voit que ces images ne sont pas semblables à l'objet et que pour avoir la plus grande similitude possible entre l'objet et l'image, il faut d'une part que la fréquence de coupure soit élevée, mais aussi, pour le contraste restitué dans l'image soit le meilleur possible, que les coefficients k_1 , k_3 ,... soient les plus voisins possible de 1.

Comment, en optique, peut-on mesurer ce coefficient k ? En mesurant la fonction de transfert optique; et ce sera un moyen de choix puisqu'elle permettra d'avoir accès à la fois à la résolution maximum et au transfert de contraste.

III. - FONCTION DE TRANSFERT OPTIQUE

III.1. Définition de la F.T.O.

Rappelons brièvement que la Fonction de Transfert Optique (F.T.O.) d'un système optique est la transformée de Fourier de la répartition des éclaircissements dans l'image d'un point. Cette fonction de transfert est, en général, une fonction complexe dont le module représente la Fonction de Transfert de Modulation (contraste de l'image) et l'argument, la Fonction de Transfert de Phase (déplacement de l'image par rapport à sa position théorique).

$$F(\mu) = M(\mu) \exp. [-j \Phi(\mu)]$$

Bien évidemment, la Fonction de Transfert Optique n'est valable, de par sa définition, que si le système optique considéré est linéaire et isoplanétique.

Par système linéaire, on entend un système tel que l'image de

la superposition de deux objectifs distincts est identique à la superposition des images de ces deux objets formées dans les mêmes conditions.

Par système isoplanétique, on entend un système tel que la réponse image d'un point est indépendante de la position du point dans l'espace objet.

Ces conditions de validité de la fonction de transfert étant acquises, deux principes de mesure peuvent être utilisés.

— L'un fait appel à la mesure de la surface d'onde au niveau de la pupille (par interférométrie) dont la fonction d'auto-corrélation permet d'obtenir la fonction de transfert.

— L'autre nécessite de faire l'analyse de l'image d'une fente objet puis, soit la convolution directe par une mire à transparence sinusoïdale, soit le calcul de la Transformée de Fourier pour obtenir la Fonction de Transfert.

Spécifications :

- Gamme de focale : 10 à 2 000 mm.
- Mesure en tous points du champ :
- Champ : Sagittale ou tangentielle. $\pm 50^\circ$ ou ± 100 mm.
- Collimateur : Parabole offaxis — focale 2 000 mm \varnothing 150 mm.
- Fréquences spatiales : 5 à 100 mm^{-1} 5 à 200 mm^{-1} .
- Source : Lampe quartz iode - 3 200 °K et filtres interférentiels*.

De plus, l'ACOFAM permet les mesures classiques telles que longueur focale, astigmatisme, aberration chromatique et observation au point lumineux. Aussi, l'ACOFAM peut être

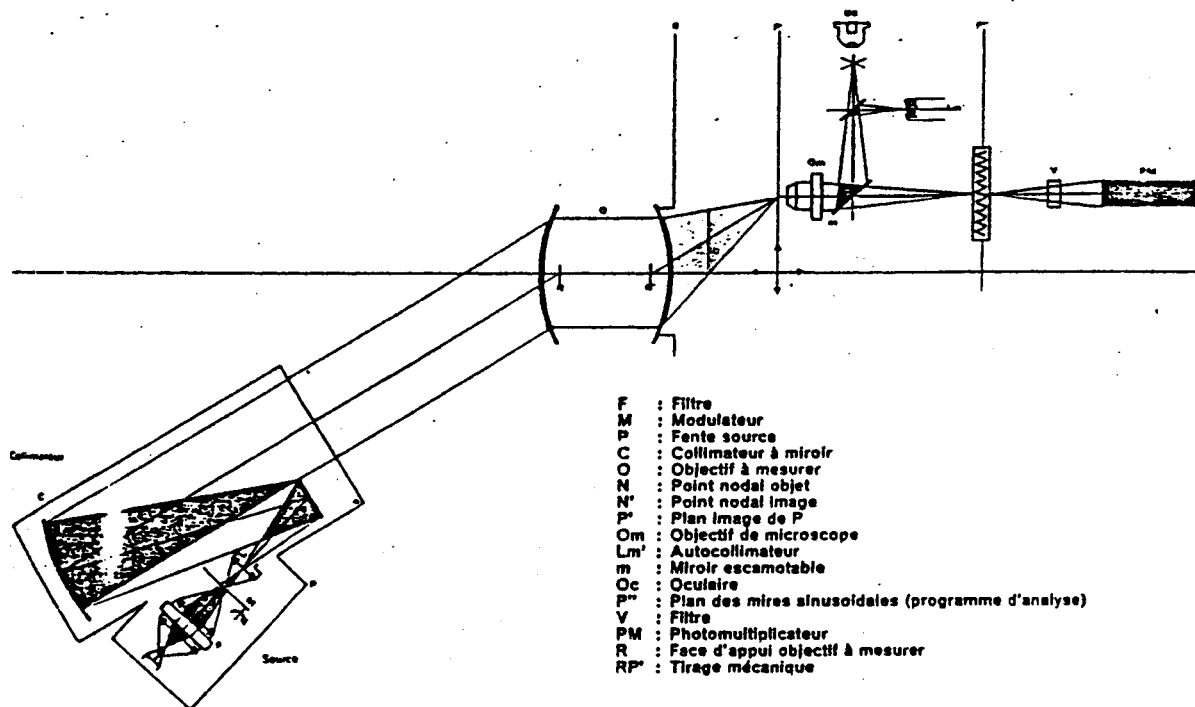


Fig. 3 - Schéma de principe de l'ACOFAM

La définition de la Fonction de Transfert ainsi donnée, comment d'un point de vue pratique pourra-t-on la mesurer? De la même manière qu'en électro-acoustique (II.1.). Le signal d'entrée est constitué par une mire à transparence sinusoïdale de fréquence spatiale μ et d'amplitude « a ». L'objectif en forme une image d'amplitude « a' ». Le rapport $\frac{a'}{a}$ donne le coefficient de transfert pour la fréquence μ .

Ce principe de mesure est utilisé dans l'ACOFAM (fig. 2) développé par la S.A. MATRA (sous licence ANVAR).

III.2. Description de l'ACOFAM

Une fente fine est placée au foyer d'un collimateur. Le système optique à mesurer en forme une image dans son plan focal. Cette image est ensuite projetée sur une mire sinusoïdale animée d'un mouvement de translation. Le récepteur fournit un signal proportionnel au flux transmis à l'électronique de mesure. Les valeurs de la F.T.M. sont fournies sous forme analogique ou digitale (fig. 3).

considéré comme un banc de mesure classique qui peut également effectuer la mesure de la F.T.M. ou comme un banc photoélectrique qui peut également être utilisé pour les mesures traditionnelles. Les deux séries de mesure étant effectuées dans les mêmes conditions.

L'importance du domaine I.R. a nécessité l'étude et la réalisation de sous-ensembles à adapter à l'ACOFAM pour étendre son domaine d'utilisation.

De nombreux appareils ont été vendus dans le monde et sont utilisés en Europe, en Russie, en Chine, au Japon et aux U.S.A., tant chez les constructeurs de systèmes optiques que chez les utilisateurs.

Conçu à l'origine pour l'utilisation au laboratoire, l'ACOFAM, parce que trop sophistiqué; ne pouvait être utilisé comme appareil de contrôle de production et MATRA a développé un appareil simplifié l'ACOMAT.

* La température de 3 200 °K est celle de la lampe halogène utilisée. Des filtres compensateurs permettent d'obtenir la courbe S (λ) correspondant à la lumière du jour ou à la lumière artificielle.

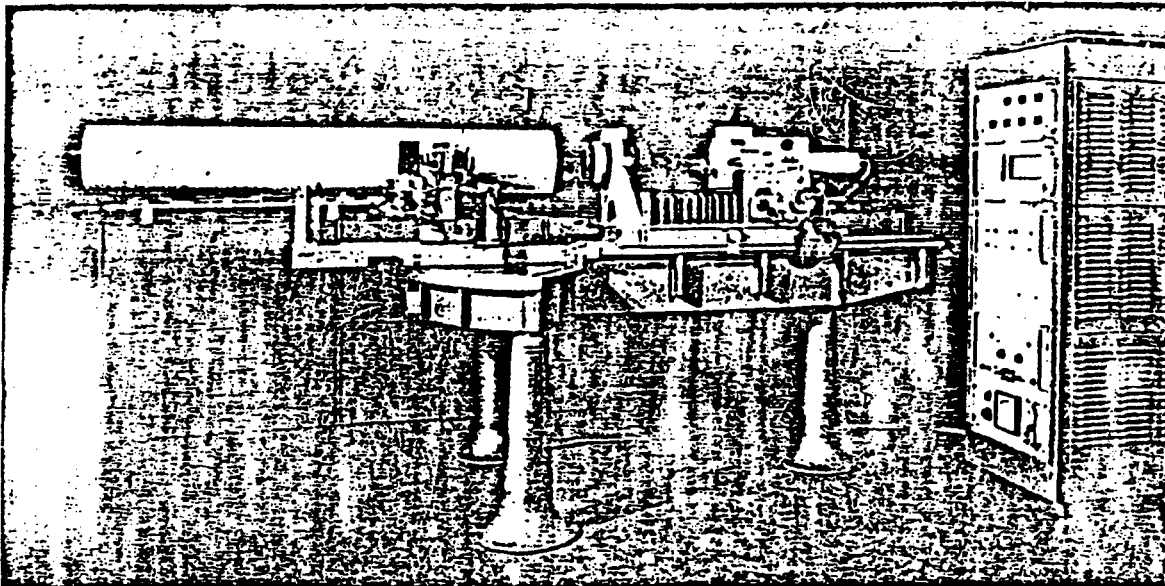


Fig. 2 - Vue générale de l'ACOFAM

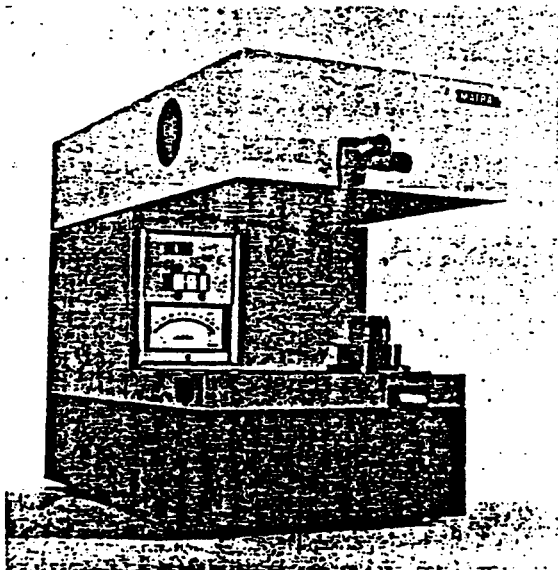
III.3. L'ACOMAT

Le problème qui se pose au niveau du contrôle de production est différent de celui du contrôle de laboratoire. En effet, si l'ACOFAM a pour but de mesurer la F.T.M. avec précision et pour l'ensemble des paramètres dont elle dépend, l'ACOMAT

a pour but de comparer la qualité de l'image formée par un objectif à tester à celle de l'image formée dans les mêmes conditions par un objectif de référence. Il utilise le même principe de mesure de la F.T.M. (fig. 4).

Une fente fine est placée au foyer d'un collimateur. L'objectif à contrôler en forme une image dans son plan focal. Cette image est projetée par un objectif de microscope sur un réseau tournant qui module la lumière. Après détection et amplification, le signal est filtré pour sa fréquence fondamentale et son premier harmonique. Après normalisation, le signal est envoyé soit à un indicateur, soit à un voyant lumineux maximum-minimum qui peut être ajusté. Pour les mesures en atelier, les indicateurs lumineux sont ajustés par comparaison avec un objectif connu considéré comme objectif de référence

Fig. 4 - L'ACOMAT



Spécifications :

- Gamme de focale : 5 à 200 mm.
- Champ : ajustable de 0 à 30°
ou 0 à 21,6 mm.
- Azimut : continu de 0 à 180°.
- Fréquences spatiales : 7 et 21 mm⁻¹ ou 15 et 45 mm⁻¹.
- Source : Quartz iode — 3 200° ou filtres monochromatiques*.
- Durée de la mesure : environ 15 secondes.

Un effort tout particulier a été apporté pour rendre l'ACOMAT reproductible et d'un manement rapide.

- Reproductible puisqu'il s'agit d'un comparateur dont le but n'est pas de mesurer la F.T.M. d'un objectif mais seulement de comparer la mesure de contraste d'un objectif à celle d'un étalon (parfaitement connu par mesures sur ACOFAM mesuré dans les mêmes conditions).

- Rapide puisqu'il s'agit d'un appareil devant trouver sa place dans la chaîne de fabrication série ou en cours de contrôle final.

* La température de 3 200°K est celle de la lampe halogène utilisée. Des filtres compensateurs permettent d'obtenir la courbe S(λ) correspondant à la lumière du jour ou à la lumière artificielle.

IV. - APPLICATION AU CONTROLE D'UN OBJECTIF DE PHOTOGRAPHIE

IV.1. Paramètres dont dépend la F.T.M.

La fonction de transfert dépend de nombreux paramètres :
 $F.T.M. = f(\mu, N, \lambda, \Delta x', R \text{ ou } T, Y', \varphi, \dots)$
 où μ est la fréquence spatiale,
 N l'ouverture numérique,
 λ la longueur d'onde,
 $\Delta x'$ la défocalisation,
 Y' la position dans le champ,
 φ l'azimut
 R, T direction sagittale ou tangentielle.

Si donc, on veut connaître en détail, la qualité d'un système optique, on se trouve en présence d'un nombre considérable de courbes de F.T.M.

Supposons que nous voulions mesurer un objectif de photographie.

Nous pouvons fixer par exemple : 3 ouvertures, 4 longueurs d'onde (3 monochromatiques et 1 lumière blanche).

— 5 plans images : meilleur plan sur l'axe et 2 plans de part et d'autre.

— 7 points du champ : 3 de part et d'autre de l'axe optique pour 2 directions sagittale et tangentielle.

On s'aperçoit que l'ensemble de ces mesures représente 840 courbes de F.T.M. en fonction de la fréquence spatiale. Il est certain que s'il s'agit d'un prototype d'objectif, ce nombre élevé de courbes peut être jugé nécessaire. Mais que se passe-t-il si l'on veut comparer 2 objectifs ? On est alors en présence de 1 680 courbes et il est impossible de faire un choix. Il est donc nécessaire de rechercher une méthode simplifiée d'une part et ensuite de définir un mode de présentation des courbes simplifié permettant de comparer 2 nombres (ce qui serait l'idéal) ou tout au moins un nombre limité de courbes, d'autre part.

IV.2. Méthode simplifiée

Depuis de nombreuses années, la norme AWAR est utilisée. Elle permet de qualifier par un nombre unique le pouvoir de résolution moyen dans tout le champ de l'objectif. Pour cela, on divise le champ image de l'objectif à évaluer en un nombre n de zones limitées par des cercles concentriques au centre du champ. La résolution est mesurée au centre de chacune de ces zones et pondérée par un nombre qui est le rapport de la surface de la zone considérée A_i à la surface totale A du champ utile. Afin de tenir compte de l'astigmatisme, on mesure la résolution suivant les 2 directions, sagittale (R_i) et tangentielle (T_i).

L'AWAR est alors défini par

$$AWAR = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} \sqrt{R_i \times T_i}$$

L'utilisateur a donc ainsi la possibilité de pondérer lui-même les différents points du champ en fixant à chacune des zones un poids différent. Ce qui est très important et renforce l'intérêt de l'AWAR, est qu'un seul nombre permet de représenter l'ensemble du champ.

En partant de la même idée, nous l'avons transposée en utilisant non plus la résolution mais la modulation en fonction de la fréquence spatiale. C'est-à-dire que pour chacune des fréquences spatiales utilisées, l'AWAM permet de qualifier par un nombre unique le facteur de modulation moyen dans tout le champ de l'objectif.

$$AWAM = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} \sqrt{M_{Ri} \times M_{Ti}}$$

Chaque plan image peut donc être représenté par une seule courbe AWAM (F.T.M. pondérée en fonction de la fréquence spatiale).

En fonction de la défocalisation, la courbe AWAM la plus haute correspond alors au plan de mise au point où la F.T.M. moyenne est la plus élevée, compte tenu du critère de pondération choisi.

Si l'on revient à l'exemple du paragraphe IV.1., on a vu qu'il fallait environ 840 courbes de F.T.M. par objectif. En utilisant l'AWAM on aura seulement 12 courbes correspondant à 3 ouvertures et 4 longueurs d'onde.

Depuis longtemps déjà, PHOTO-REVUE présente des résultats de mesure d'objectifs de fabrication courante. Nous avons simplifié encore plus la méthode de mesure en ne prenant que 4 points dans le champ (dont 2 symétriques par rapport à l'axe optique pour s'assurer de la symétrie de l'image c'est-à-dire du montage correct des différentes lentilles constituant l'objectif). De plus, nous n'effectuons les mesures que pour la lumière blanche (3 200 °K lumière du jour) et dans un seul plan qui correspond à la meilleure mise au point au centre du champ (cas général d'utilisation des objectifs sur les appareils modernes).

L'ensemble de ces mesures correspond cependant à 27 courbes (9 par ouverture) et il aurait été impossible de vous présenter un si grand nombre de courbes par objectif. L'intérêt de l'AWAM est évident, puisque 3 courbes seulement sont présentées et correspondent à 3 ouvertures numériques différentes.

V. - INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

De même qu'en électro-acoustique, la bande passante, c'est-à-dire les limites extrêmes de transmission des fréquences, ne suffit pas pour définir la qualité de la chaîne, en optique la fréquence de coupure ou « pouvoir de résolution » ne suffit pas pour définir la qualité de l'image.

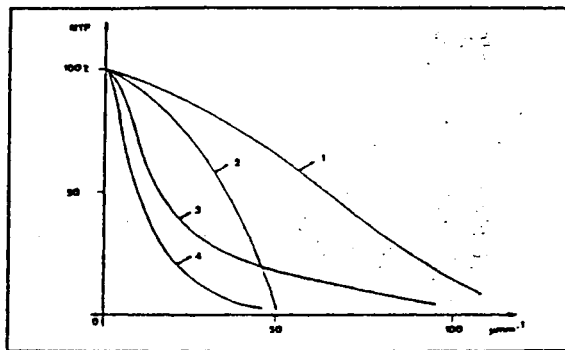


Fig. 5 - Exemple de courbes F.T.M. de 4 objectifs

La figure 5 représente la courbe de F.T.M. de 4 objectifs. Les objectifs 1 et 3 ont un pouvoir de résolution élevé tandis que les objectifs 2 et 4 ont un pouvoir de résolution plus faible. Par contre les objectifs 1 et 2 ont pour les basses fréquences spatiales une bonne F.T.M.

Incontestablement l'objectif 1 est le meilleur et les images présenteront un contraste et une résolution excellente.

Par contre les objectifs 3 et 4 donneront des images mal contrastées avec une meilleure définition des détails pour l'objectif 3.

Il ne faut cependant pas oublier qu'au-delà de 40 mm^{-1} les films courants ne restituent plus d'information; par conséquent, l'objectif 2 sera excellent et de toute façon bien meilleur que l'objectif 3 bien que son pouvoir de résolution soit beaucoup plus faible.

En utilisant comme critère de qualité seulement le pouvoir de résolution, on aurait classé les objectifs dans l'ordre 1, 3 à égalité, puis assez loin 2, 4 alors qu'en fait il faut les classer dans l'ordre 1, 2 puis assez loin 3 et 4.

L'utilisateur d'un système optique devra se souvenir au moment du choix de l'objectif que les hautes fréquences (souvent bien inférieures à la fréquence de coupure) donnent les détails mais que ce sont les basses fréquences qui sont responsables du contraste de l'image.