



## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

---

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE  
TRAITEMENT DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

Madame SERRES Marie-Christine

CIT-ALCATEL

---

**RESUME** Ce banc d'optique, que l'on pourrait appeler analyseur spectro-spatio-temporel, utilise les propriétés de l'optique cohérente pour donner la transformée de Fourier du signal en deux dimensions.

Le support d'information est un film photographique à développement rapide, qui défile horizontalement à vitesse constante.

Quarante huit pistes sont enregistrées sur la hauteur du film. La transformée de Fourier à deux dimensions donne l'analyse spectrale en même temps qu'une information sur la position du bruiteur écouté par la base car elle tient compte du déphasage existant entre les différentes pistes.

Le traitement rapide et continu du film permet de faire une analyse en temps réel légèrement différé, donc de garder la notion de temps.

**SUMMARY** This optical device - a "frequency-space-time" analyser uses the properties of coherent optics for obtaining the two dimensional Fourier transform of the signal.

The information supporting material is a fast developing photographic film that moves horizontally at a constant speed.

Forty-eight channels are recorded across the film width. The two dimensional Fourier transform provides the spectral analysis together with an information about the direction of the signal being listened to with the antenna, as the phase difference between the different channels are taken into account.

A fast and continuous processing of the film makes it possible to perform a slightly delayed real time analysis, and therefore to keep the time information.

# PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

## 1. - INTRODUCTION

Ce banc d'analyse que l'on pourrait appeler spectro-spatio-temporelle, utilise les propriétés de l'optique cohérente pour donner la transformée de Fourier en deux dimensions du signal à traiter. Le support d'information est un film photographique. La bande de fréquence du signal analysé est comprise entre quelques Hertz et 6000 Hertz.

Le signal à traiter est envoyé sur des diodes électroluminescentes qui impressionnent un film défilant à vitesse constante. Le film ainsi exposé, est mis en contact pendant une vingtaine de secondes avec un film de développement rapide ; il passe ensuite dans le système optique qui donne instantanément la transformée de FOURIER à deux dimensions du signal enregistré.

On utilise quatre méthodes différentes d'exploitation du spectre :

- La télévision qui donne des notions globales assez précises sur le spectre et la direction du bruiteur
- L'enregistrement sur film qui donne les variations du spectre en fonction du temps
- L'observation au microscope qui donne avec grande précision le site du bruiteur.
- L'enregistrement du spectre sur graphique qui donne les amplitudes relatives des différentes raies.

Nous pensons diviser cette présentation en quatre paragraphes :

- Enregistrement du signal sur le film photographique
- Transformée de Fourier optique
- Différentes exploitations du spectre.
- Performances de l'appareil



PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANNEE BERTHE

---

2. - ENREGISTREMENT DU SIGNAL SUR LE FILM PHOTOGRAPHIQUE

Le signal à traiter provient de la base BERTHE qui est formée de six mille récepteurs réparties en 48 lignes horizontales.

Le signal provenant de chaque ligne alimente une diode électroluminescente qui éclaire une piste du film.

On forme ainsi 48 pistes sur la hauteur du film qui défile horizontalement à vitesse constante.

Les fréquences temporelles du signal de départ sont donc transformées en fréquences spatiales sur le film.

La fréquence spatiale ou longueur d'onde sur le film  $\lambda$  est liée à la fréquence temporelle  $\gamma$  du signal et à la vitesse du film  $v$  par la formule classique :

$$\lambda = \frac{v}{\gamma}$$

Trois vitesses de défilement sont possibles :

18,75 mm/sec qui permet d'enregistrer des fréquences allant jusqu'à 1500 Hz

37,5 mm/sec qui permet d'atteindre 3000 Hz

75 mm/sec qui permet d'atteindre 6000 Hz

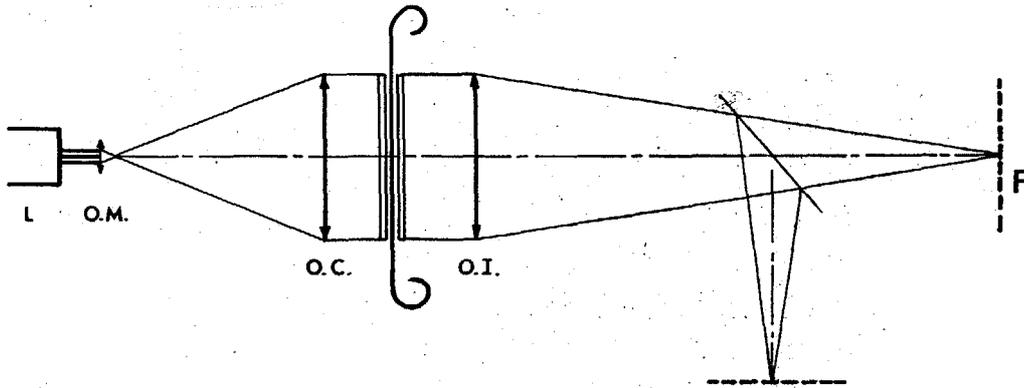
Le film ainsi impressionné est mis en contact avec un film de traitement rapide ; les deux films défilent alors ensemble dans une étuve à 40°C ; ils sont ensuite séparés, et le négatif passe dans le faisceau parallèle de lumière cohérente.

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

3. - TRANSFORMEE DE FOURIER OPTIQUE

Le principe utilisé est tout à fait classique ;  
il est schématisé sur la figure suivante.

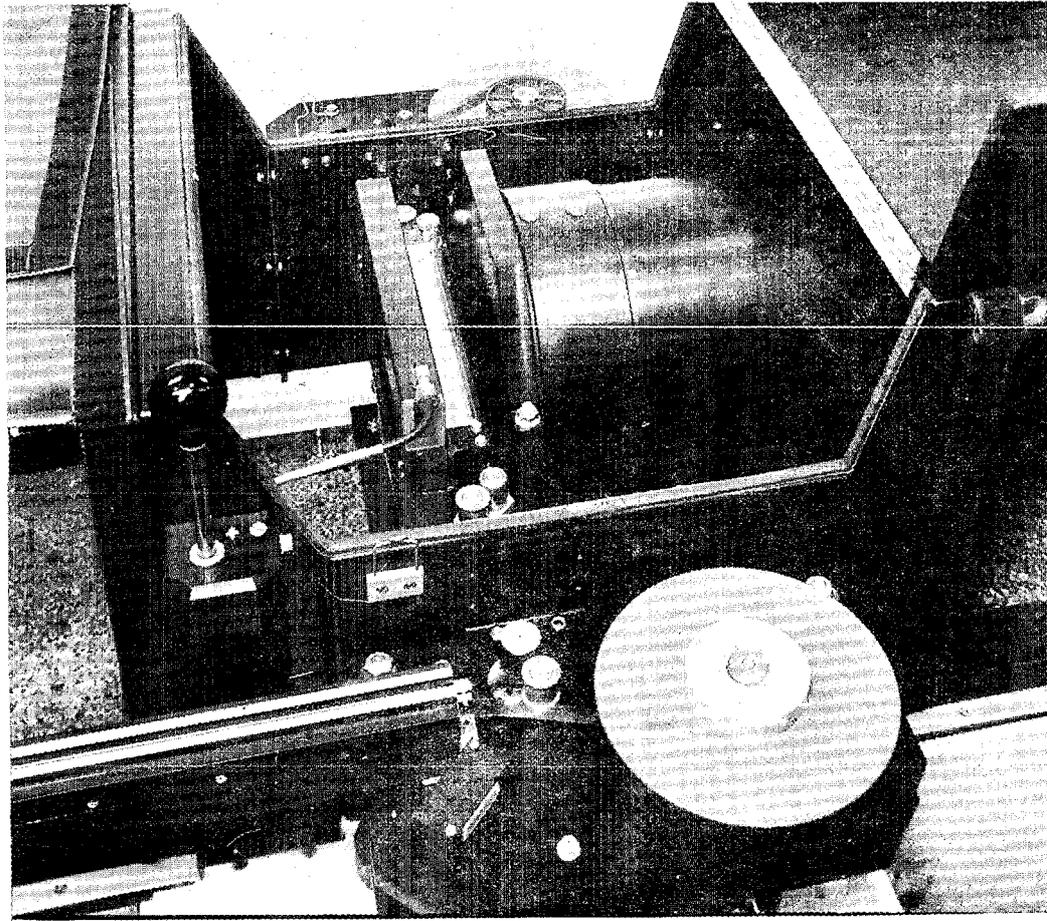


On forme un faisceau parallèle de lumière  
cohérente à l'aide d'un laser He - Ne = L suivi d'un  
objectif de microscope : O.M. et d'un collimateur O.C.

L'objectif intégrateur O.I, donne dans son plan focal,  
F, la transformée de Fourier à deux dimensions de la  
répartition d'amplitude lumineuse dans le faisceau  
parallèle.



Une partie du système est montrée sur la photo N°



Photographie N°1

On peut y voir la sortie de l'étuve de développement (en bas, à gauche) le récupérateur de film de transfert (devant), au fond le récupérateur de film négatif après son passage dans le faisceau parallèle de lumière cohérente.

On distingue aussi la cuve à immersion (qui permet de compenser les défauts de phase dûs aux irrégularités d'épaisseur du film) ainsi qu'une partie de l'objectif intégrateur.

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

Le film étant placé dans le faisceau parallèle, on obtient dans le plan focal F, la transformée de Fourier à deux dimensions de la fonction de transparence du film. On a donc le spectre du signal enregistré.

La fréquence d'une composante spectrale est proportionnelle à la distance existant entre la raie correspondante et le foyer de l'objectif.

Dans le cas d'un enregistrement à la vitesse la plus rapide, on a 6000 Hz à 102 mm du foyer.

La longueur du film sur laquelle on intègre est de 18 cm ; cela correspond à 2,5 secondes, 5 et 10 secondes respectivement, pour chacune des trois vitesses d'enregistrement ; cela permet une finesse d'analyse théorique de 0,1 Hz, 0,2 Hz et 0,4 Hz.

L'exposition du film et son développement, qui se font de façon continue, ainsi que le passage immédiat dans le faisceau permettent de garder la notion de temps malgré le retard de quelques dizaines de secondes nécessaires au développement.

La transformée de Fourier en deux dimensions tient compte des déphasages existant entre les différentes pistes. Pour un déphasage entre pistes nul, le spectre s'étale sur une ligne horizontale, quand le déphasage n'est plus nul le spectre s'incline d'un angle  $\alpha$  directement lié à l'angle de site  $\theta$  du bruiteur écouté ; on peut donner la formule :

$$\text{tg } \alpha = \frac{d}{y_0} \frac{v}{c} \sin \theta$$

$d$  = distance entre les lignes de la base :  
10 cm  $\rightarrow 10^2$

$y_0$  = distance entre les pistes sur le film :  
50  $\mu$   $\rightarrow 5 \cdot 10^{-2}$

$v$  = vitesse de défilement du film lors de l'enregistrement = 75 mm/sec  $\rightarrow 75$

$c$  = vitesse de propagation du son dans l'eau :  
1500 m/sec  $\rightarrow 15 \cdot 10^5$

$$\text{tg } \alpha = \frac{10^2}{5 \cdot 10^{-2}} \frac{75}{15 \cdot 10^5} \sin \theta$$

$$\theta = 90^\circ \Rightarrow \text{tg } \alpha = 0,1 \Rightarrow \alpha = 6^\circ$$



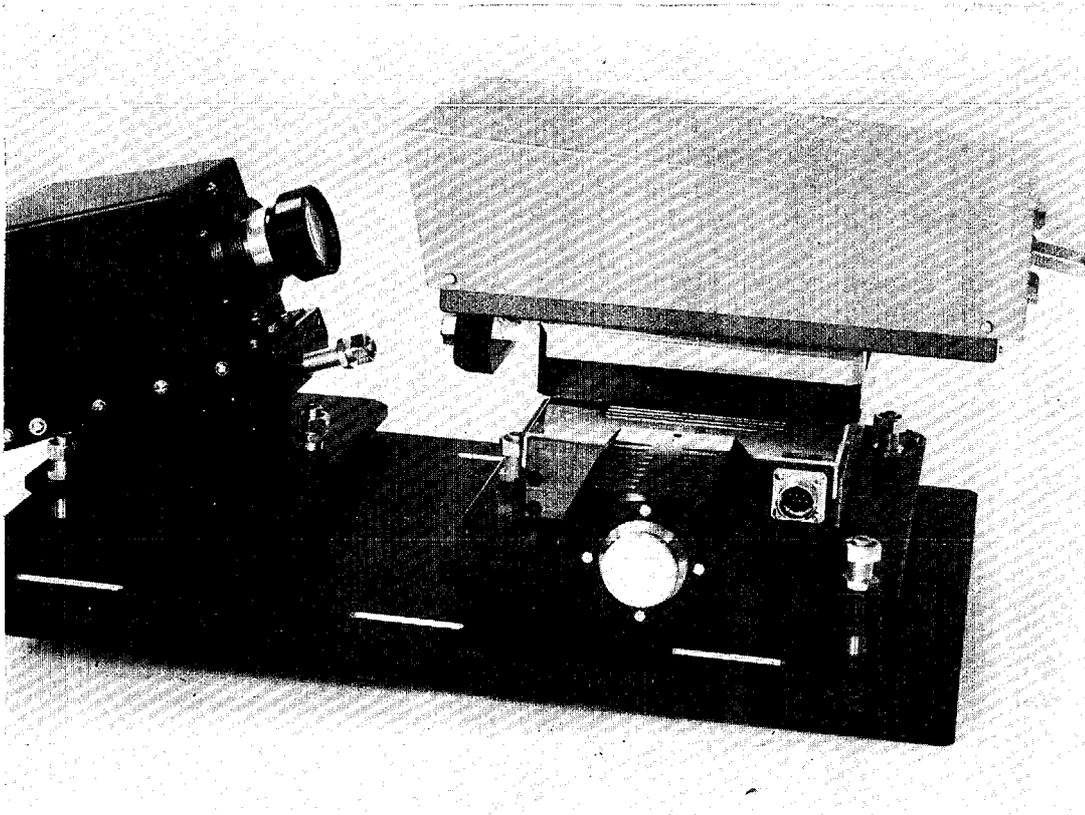
PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

4. - DIFFERENTS TYPES D'EXPLOITATION DU SPECTRE

4.1. - Caméra de télévision

Le système est montré sur la photographie  
N°2.



Photographie N°2

Devant la caméra (à gauche de la photo), on voit un petit système de projection qui permet d'avoir sur le récepteur, une échelle graduée à la fois en Hertz et en millimètres.

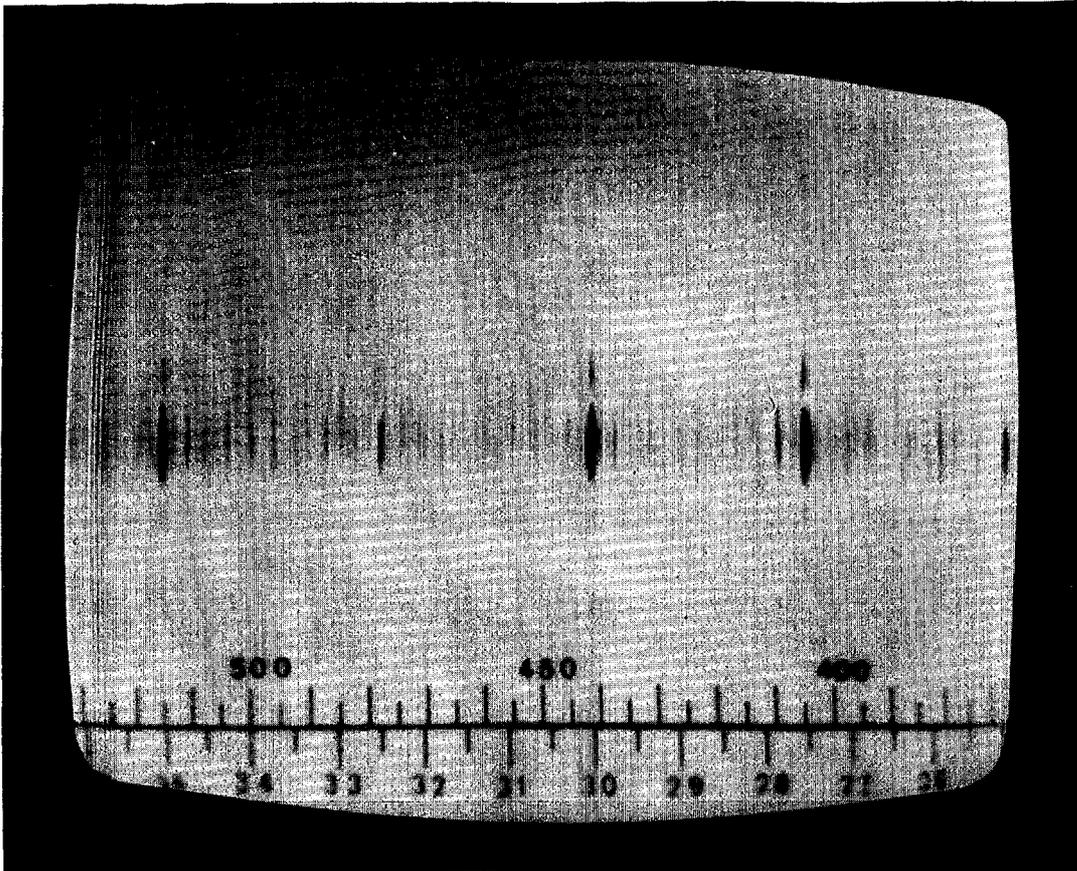
La caméra est montée sur une table motorisée qui permet le déplacement sur toute la longueur du spectre.



PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

La photographie N°3 montre l'écran du récepteur



Photographie N°3

On voit l'échelle en Hz au-dessus de l'échelle en millimètres. Le champ analysé est situé entre 370 Hz et 530 Hz, ce qui fait en tout 160 Hz pour un film enregistré à 18,75 mm/sec, 320 et 640 Hz respectivement pour les vitesses double et quadruple.

Ce système permet de connaître très rapidement l'aspect général du spectre et de choisir l'endroit que l'on voudra observer de façon plus détaillée par les autres moyens d'analyse.

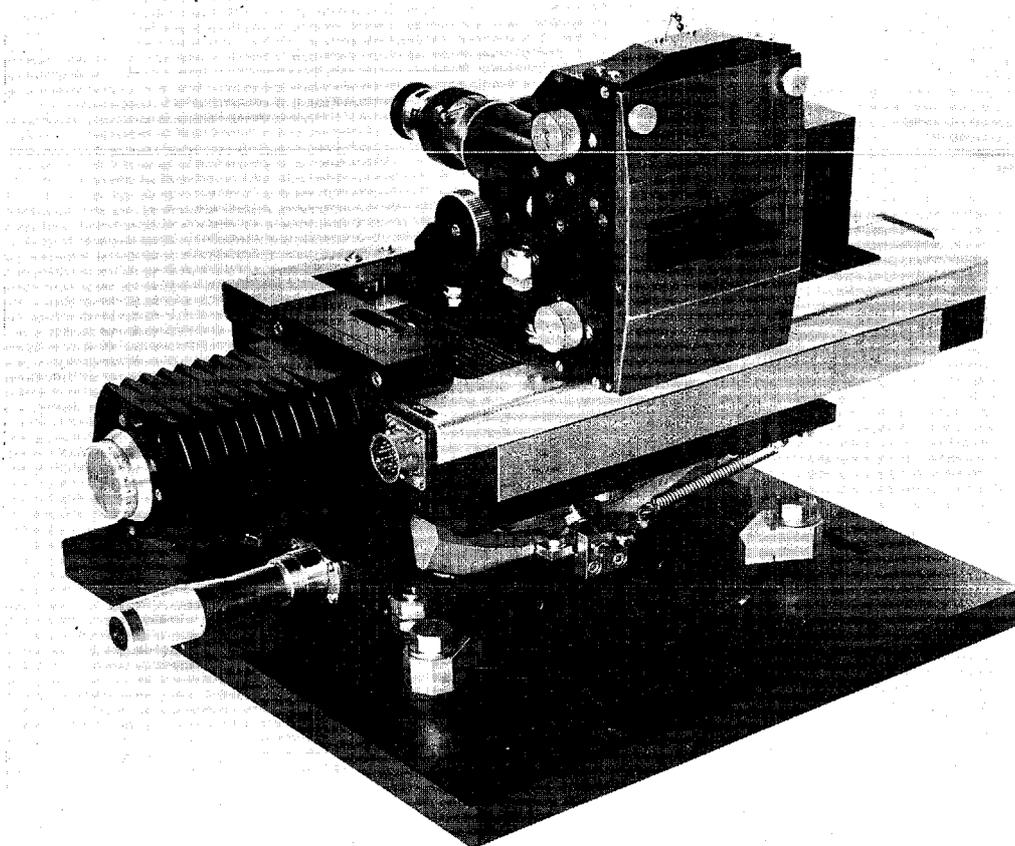


## PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

### 4.2. - Enregistrement sur film

L'enregistrement est fait sur un film 70 mm ; par l'intermédiaire d'une caméra sans objectif que l'on voit sur la photographie N°4.



Photographie N°4

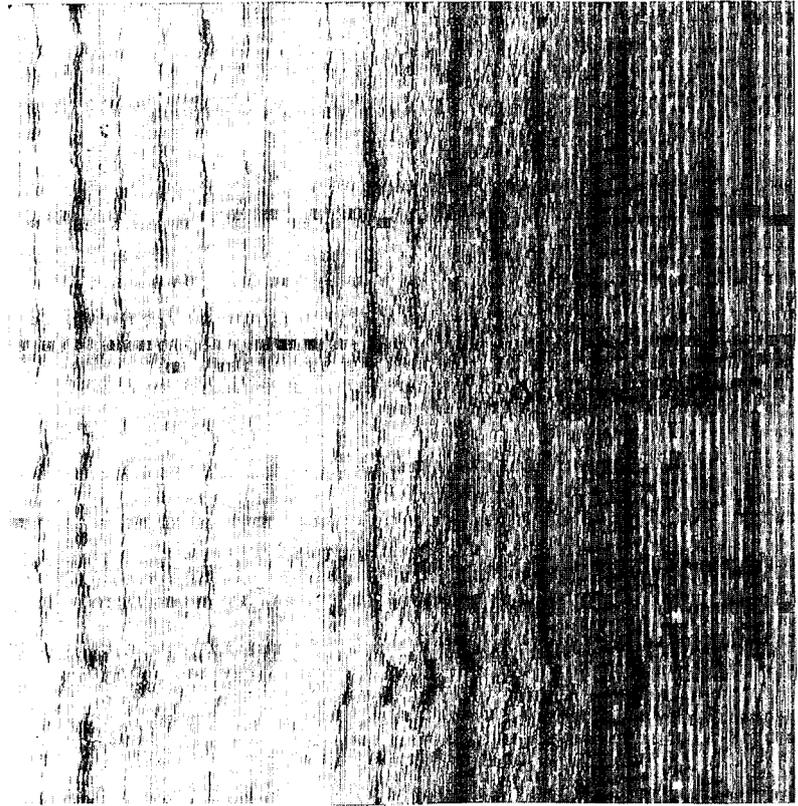
La largeur de film utilisable est de 60 mm qui permet d'enregistrer 60 % du spectre.

Le montage sur table motorisée permet de choisir la portion du spectre que l'on veut enregistrer.

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

La photographie n° 5 montre un morceau d'enregistre-  
ment sur film 70 mm.



Photographie N° 5

4.3. - Observation au microscope

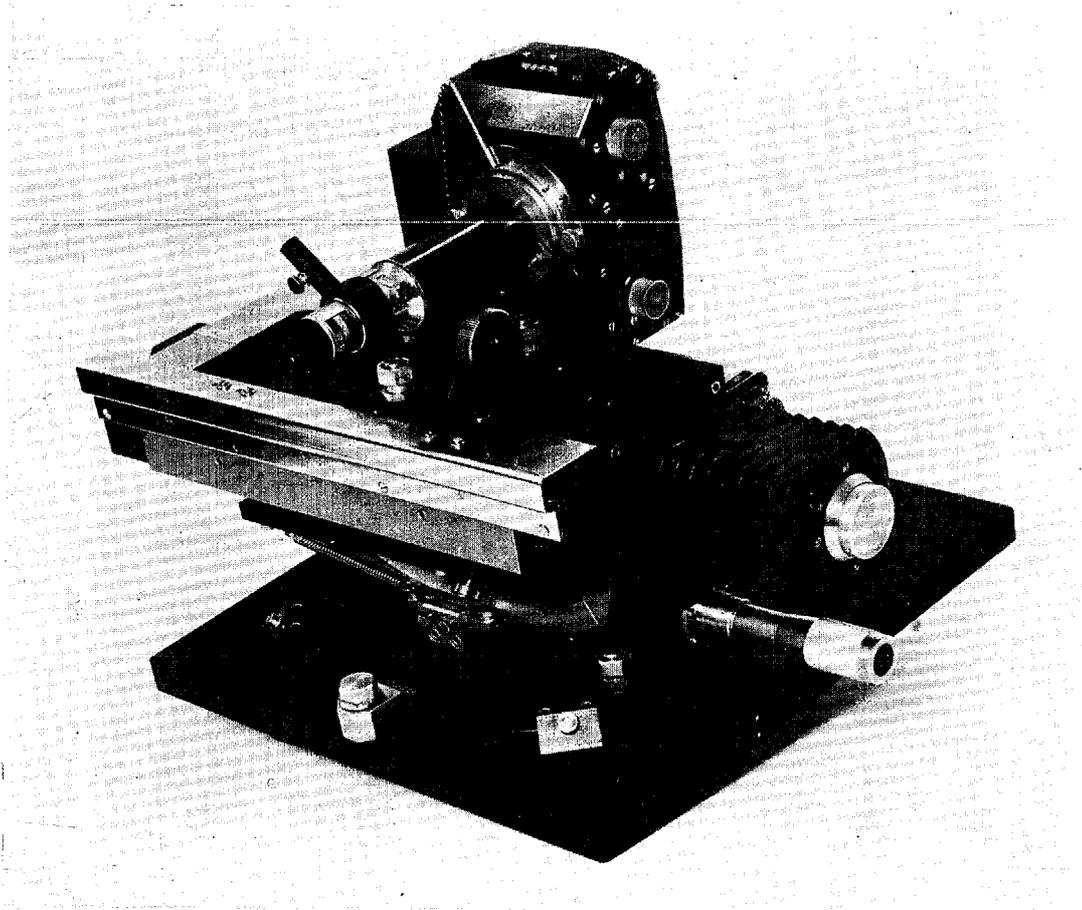
Le microscope a un champ très réduit, mais son grossissement de cent permet de voir chaque raie avec une grande précision. Il est monté sur une table motorisée dont l'emplacement est affiché sur ni- xies avec une précision de dix microns qui corres- pondent à 0,15 Hz ; 0,30 Hz et 0,60 Hz suivant la vitesse d'enregistrement sur le film 16 mm



## PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

On peut voir le microscope sur les photographies  
N°4, 6 et 7.

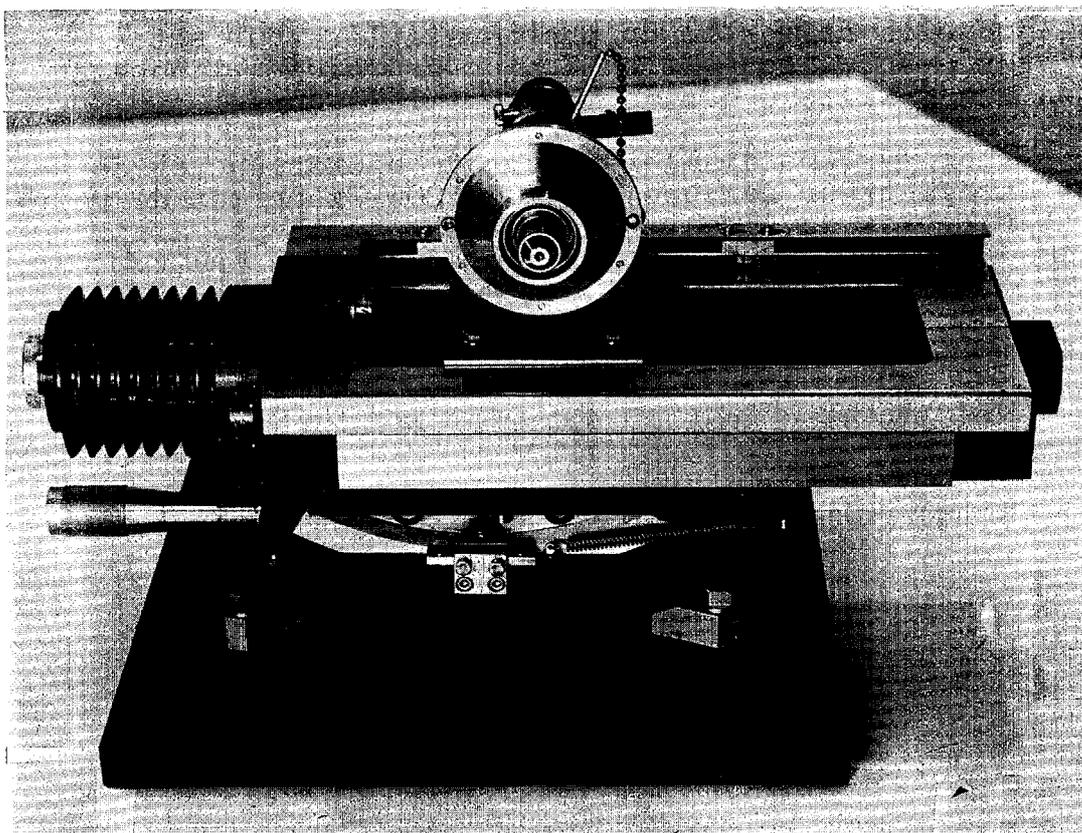


Photographie N°6

La table est inclinable grâce au bouton molleté  
que l'on voit sur la droite, le vernier permet de  
connaître l'inclinaison du spectre à  $0,05^\circ$  près, ce  
qui correspond à un angle de site de :  $0,5^\circ$

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---



Photographie N°7

Ici, on voit le microscope de face ; sans la caméra film 70 mm, ce qui correspond à l'exploitation normale du spectre au microscope. On peut voir sur l'oculaire le petit tube sur lequel s'adapte un conducteur souple de lumière qui relie le microscope au photomultiplicateur et qui permet l'enregistrement du spectre sur graphique.



PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

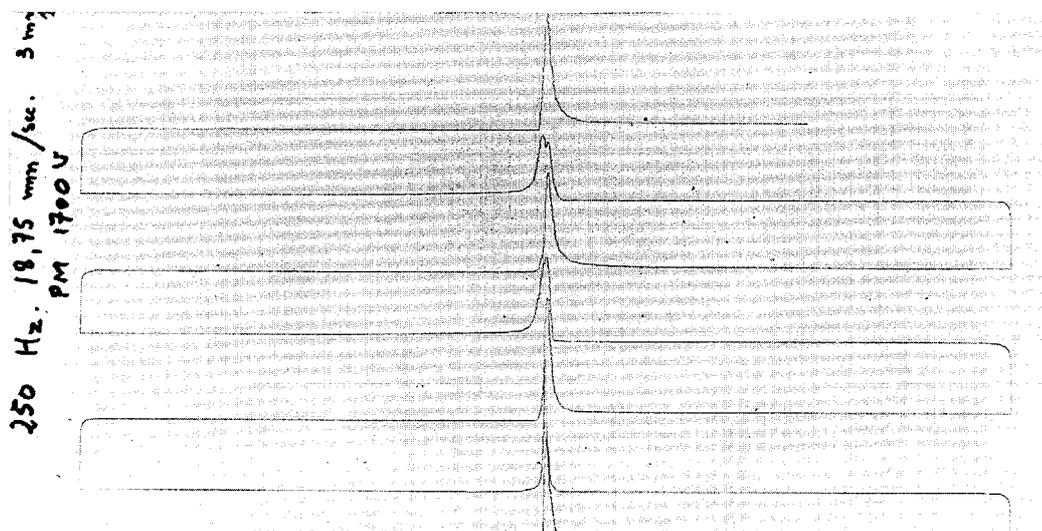
4.4. - Enregistrement du spectre sur graphique

La sonde de l'oculaire du microscope, permet de prendre une partie de la lumière de l'image donnée par l'objectif et de l'envoyer au photomultiplicateur.

La tension de sortie du photomultiplicateur est envoyée sur l'échelle en X d'un graphique, l'échelle en Y est liée au déplacement du microscope.

Un système d'aller-retour du microscope et de l'enregistreur sur une bande de 200 Hz permet de voir l'évolution du spectre en fonction du temps, ainsi que de retrouver des raies noyées dans un bruit.

La photographie N°8 montre l'enregistrement d'une fréquence pure.

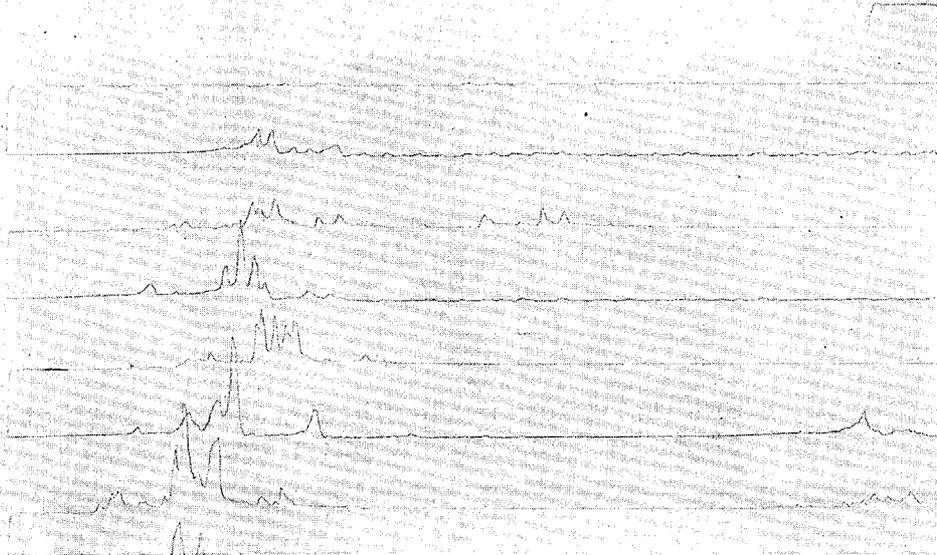


Photographie N°8

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

Les photographies N° 9 et 10 donnent deux  
exemples de spectre de bruits



Photographie N°9



Photographie N°10



PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

5. - PERFORMANCES

5.1. - Largeur spectrale

La bande spectrale que l'on peut analyser s'étend entre 10 Hz et 6000 Hz ; c'est à dire que la plus petite longueur d'onde que l'on enregistre sur le film est de 12,5 microns. Cette limite provient du fait que l'énergie dans la raie spectrale diminue en même temps que la longueur d'onde. Cette chute d'énergie a deux causes :

- la fente d'enregistrement de 5 microns produit une fonction d'appareil en :

$$\left( \frac{\sin \frac{\pi a}{\lambda}}{\frac{\pi a}{\lambda}} \right)^2$$

où  $a$  est la largeur de la fente d'enregistrement et  $\lambda$  la longueur d'onde enregistrée.

- la fonction de transfert de modulation du film est telle que l'on perd un rapport 6 (8 dB) en énergie quand on passe de  $\lambda = 125\mu$  à  $\lambda = 12,5\mu$

5.2. - Nombre de périodes intégrées

Le temps d'intégration dépend de la vitesse d'enregistrement du film ; il est respectivement de 2,5 ; 5 et 10 secondes, ce qui correspond à 14400 périodes.

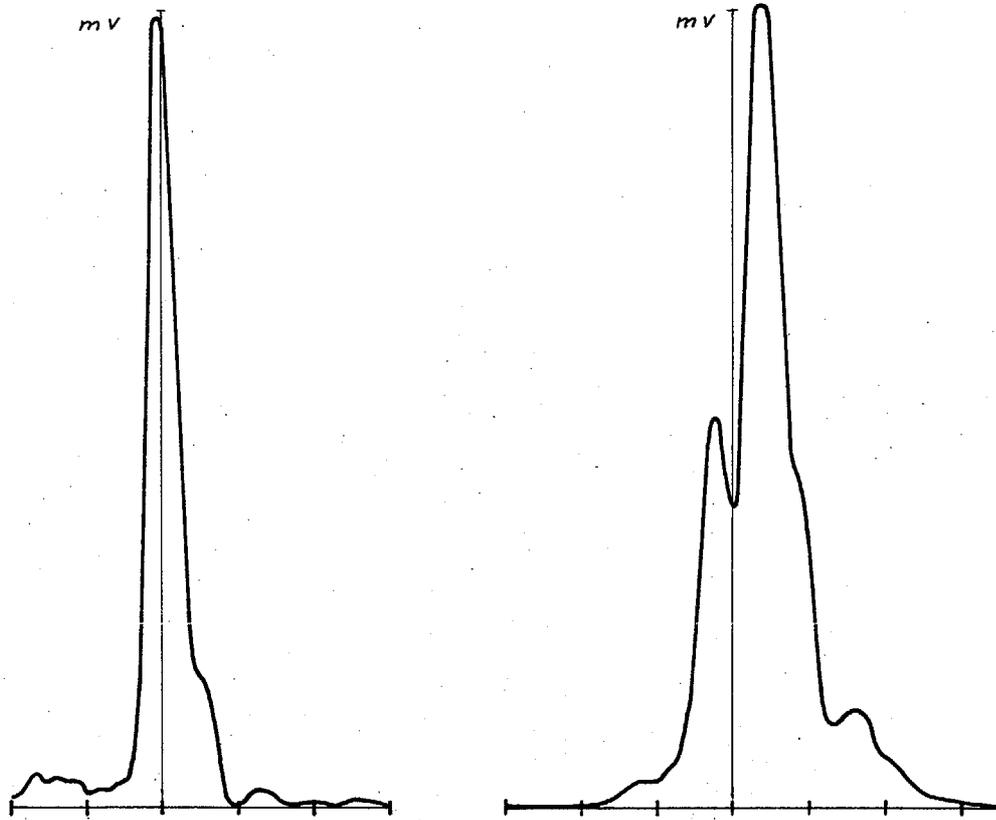
5.3. - Finesse d'analyse

La largeur théorique des raies donnée par la formule classique  $\frac{\lambda F}{D}$  est de  $7\mu$  si l'on tient compte de la pondération du faisceau qui apodise les franges, et de la largeur de la fente d'analyse de  $10\mu$  ; cette largeur théorique atteint  $12\mu$ . Pratiquement, on obtient 14 ou  $15\mu$ , qui correspondent à 0,23 ; 0,45 et 0,9 Hz suivant la vitesse et qui donnent dans tous les cas une finesse de  $1,5 \times 10^{-4}$ .

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

Les courbes N°1 et 2 donnent des exemples de raies de fréquences pures.



Courbe N°1 2000Hz à 75mm/sec    Courbe N°2 500Hz à 18,75 mm/sec

$\lambda = 25\mu$  Echelle : 1cm = 33 $\mu$      $\lambda = 25\mu$  Echelle 1 cm = 33 $\mu$

La courbe N°2 présente un défaut ; on connaît deux origines principales à ce type de défaut.

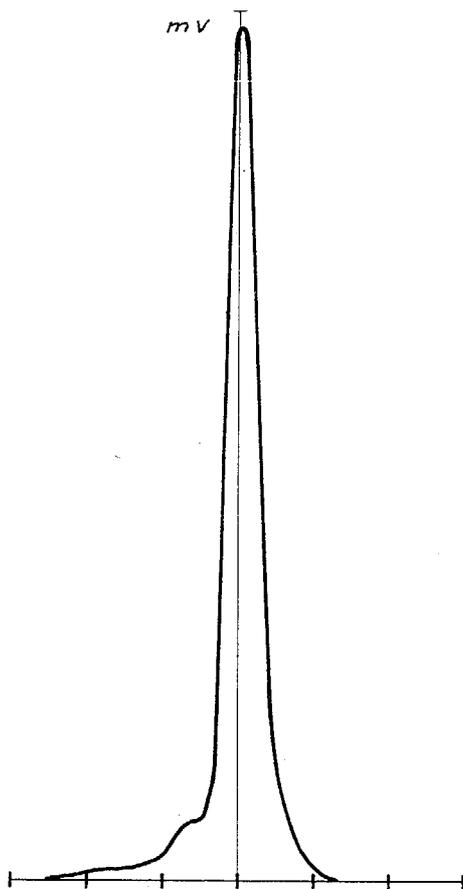
- Irrégularité dans la vitesse de défilement du film ; le défaut de la courbe 2 correspondrait à une erreur sur la vitesse de :  $2,7 \times 10^{-4}$
- Défauts de phase apportés par le film lui-même. Les défauts d'irrégularité d'épaisseur du film étant compensés par la cuve à immersion ; il reste les défauts dus aux inhomogénéités d'indice de réfraction à l'intérieur du support du film et de la gélatine. [Contre ce genre de défaut, on ne peut rien]



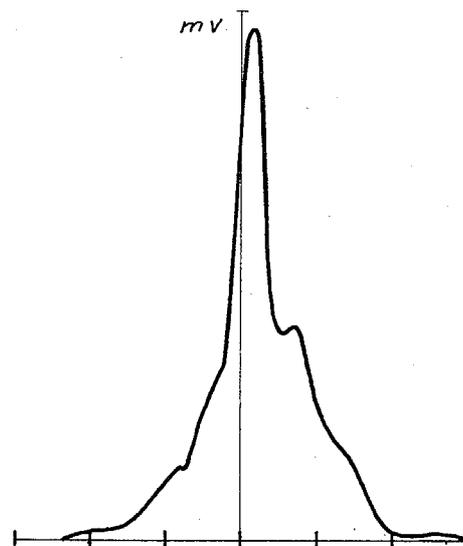
PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

Les courbes N° 3 et 4, donnent des exemples de ce type de défaut ; ce sont des raies de fréquences nulles, que l'on obtient en mettant dans le faisceau parallèle un film de transparence constante.



Courbe N°3  
Centre optique avec  
film immergé noir



courbe N°4  
Centre optique avec  
film noir immergé

PRESENTATION D'UN BANC D'OPTIQUE POUR LE TRAITEMENT  
DES SIGNAUX DE L'ANTENNE BERTHE

---

5.4. - Niveau du signal détectable dans du bruit

L'analyse spectrale d'une raie noyée dans du bruit a permis de connaître la limite du rapport signal sur bruit pour laquelle la raie peut être distinguée.

Les enregistrements faits pour un rapport signal sur bruit de +6, +3, 0 et -2 dB, ont permis de fixer la limite de perception à +3 dB pour un temps d'intégration de 2,5 s et - 2 dB après enregistrement de 30 s du signal.

Le rapport signal sur bruit est défini par le rapport puissance du signal sur niveau spectral du bruit à la fréquence de ce signal.

Conclusion :

La réalisation de ce banc d'optique, nous a permis non seulement de traiter le cas particulier de l'antenne Berthe, mais aussi de montrer que l'optique ne se limitait pas à de belles théories et à quelques manipulations de laboratoire, mais pouvait conduire à des réalisations pratiques intéressantes.