

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Presentation du banc de diffusiometrie optique CNES

Bernard Cousin, Pierre Etcheto



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057025 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326631

PRESENTATION DU BANC DE DIFFUSIOMETRIE OPTIQUE CNES

Bernard COUSIN et Pierre ETCHETO

*CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES Département Instrumentation Optique
18 Av Edouard Belin 310401 Toulouse cedex 04*

RESUME - Pour de nombreux projets spatiaux scientifiques, de télécommunications optiques et d'observation de la terre, le CNES a développé un moyen de métrologie original pour mesurer la diffusion optique des surfaces de tous types. Ce banc de diffusionométrie est présenté avec ses performances et des exemples de mesures pour différentes applications.

ABSTRACT - *Answering the needs of various scientific, optical telecommunications and earth observation spaceborne projects, CNES has developed a new device to measure the optical scatter of all kinds of surfaces. The authors describe this scattermeter and its features and performances, and show examples of measurements for several applications.*

I - INTRODUCTION

Le besoin de caractériser différents substrats en diffusion remonte aux premières études sur les télécommunications optiques par diodes laser. En effet ces systèmes optiques, qui servent en même temps à l'émission et à la réception, sont traversés dans les deux sens par des longueurs d'onde voisines avec des taux d'isolation de 80 à 100 db. Ces isolations sont assurées par des éclateurs spectraux, dont les traitements à couches minces doivent être caractérisés en diffusion pour s'assurer de leurs performances

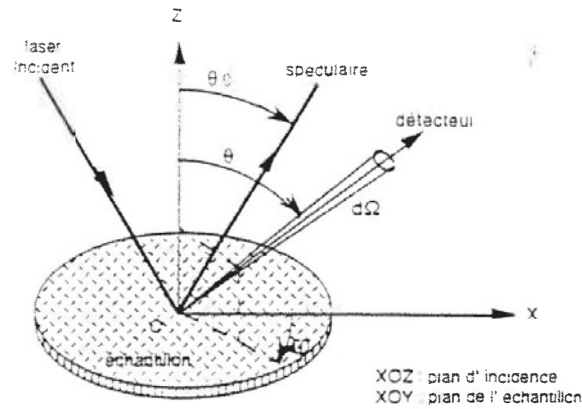
Un banc de diffusionométrie a été développé dans ce cadre. Il a été ensuite entièrement refondu nouvelles longueurs d'onde, système de détection plus poussé, pour répondre aux besoins de divers projets spatiaux, notamment en lumière parasite, thermique, caractérisation de diverses surfaces et arêtes.

Le diffusionomètre optique mesure des profils de l'indicatrice de diffusion de surfaces éclairées à différentes incidences et longueurs d'onde. La mesure s'effectue soit en réflexion (substrats opaques, absorbants, miroirs) soit en transmission (verres, couches minces) Elle s'exprime en BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Fonction) en sr^{-1} . En réflexion on l'appelle aussi BRDF, et en transmission BTDF. Le flux est diffusé dans tout le 1/2 espace (Bidirectional), mais le banc ne mesure qu'un profil à la fois

Après la présentation du principe de fonctionnement et la description de l'appareillage sont montrés quelques résultats et traitements de mesures avec leurs commentaires

II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le diffusiomètre mesure le profil de diffusion dans le plan d'incidence, défini par la direction d'éclairage et la perpendiculaire à la surface de l'échantillon.



Les sources lumineuses sont des lasers de différentes longueurs d'onde. Le flux incident est mesuré par prélèvement sur le faisceau. Le détecteur est placé au bout d'un bras mobile. Une lentille conjuguée la zone éclairée de l'échantillon avec le détecteur pour éviter tout parasitage de la mesure. Le bras tourne autour de l'échantillon et le détecteur enregistre à chaque pas la lumière diffusée. L'angle de mesure θ indique la position du détecteur par rapport à la normale de l'échantillon. L'échantillon voit le détecteur sous un angle solide $d\Omega$. L'indicatrice de diffusion, valant $BSDF \cos\theta$, est donnée par :

$$(1) \quad BSDF \cos\theta = \text{Flux diffusé} / \text{Flux incident} \times d\Omega$$

Les mesures de flux sont exprimées en Watts, l'angle solide en stéradians et donc la $BSDF \cos\theta$ en sr^{-1} . A chaque position du bras (1° ou 0.5°) on enregistre cette $BSDF \cos\theta$ et à la fin des mesures on peut tracer le profil de diffusion. A partir de ces mesures élémentaires on calcule l'intégrale de diffusion (TIS, Total Integrated Scattering) dans le demi-espace d'analyse (2π stéradians), réflexion ou transmission.

En fonction du niveau de flux diffusé on choisit 2 types de détection, soit la détection directe pour les BRDF de 1 à 10^{-4} , soit la détection synchrone de 10^{-4} à 10^{-6} .

Suivant les mesures à effectuer, un grand nombre de paramètres peuvent être choisis en début de manipulation, notamment la nature de la mesure (réflexion ou transmission), la longueur d'onde, la polarisation, l'incidence du faisceau sur l'échantillon, le pas angulaire d'analyse, la plage de mesure, les angles d'évitement par rapport à la direction spéculaire, le pas de rotation de l'échantillon, le choix de la détection et les temps d'intégration des détecteurs.

III - PRESENTATION DU BANC

Le diffusiomètre est composé de trois sous-ensembles solidaires d'un marbre en granit d'1.2m par 2.5m. En suivant le trajet lumineux on trouve successivement

- les sources lumineuses avec trois lasers
- le traitement du faisceau
- le caisson noir avec le bras de mesure

Le plan d'ensemble et le synoptique du banc de mesure sont donnés dans les planches 1 et 2.

Les sources de lumière

1/ Un laser Argon Spectra Physics modèle 2020-05, de longueur d'onde 514 nm, de puissance 5 Watts

2/ Un laser Saphir-Titane Spectra Physics modèle 3900, de longueur d'onde accordable entre 750 et 950 nm. de puissance moyenne 500 mW

3/ Un laser Krypton Spectra Physics, de longueur d'onde violette à 413 nm, de puissance 250 mW

Un seul laser peut alimenter le banc, les faisceaux sont dirigés par des miroirs de renvoi amovibles pour passer d'un laser à l'autre. Le laser Saphir Titane est pompé par le laser Argon. Un asservissement en puissance Spectra Physics modèle 373 est placé en sortie du laser Sa-Ti, il réagit sur le courant d'entrée du laser Argon.

Le diamètre du faisceau de sortie des lasers est de 1.5 mm à $1/e^2$ pour les lasers Argon et Krypton et 1 mm pour le Sa-Ti.

Les faisceaux lasers sont disposés dans des tubes noirs en PVC pour des raisons de sécurité oculaire. Les manipulateurs du banc portent des lunettes de protection adaptées au laser utilisé

Le traitement du faisceau

En sortie du caisson de traitement le faisceau laser va directement sur l'échantillon, ce faisceau doit être parfaitement connu et maîtrisé. Le caisson se compose de

1/ Un obturateur télécommandé permettant l'interruption du faisceau laser pour monter et régler les échantillons, et mesurer le signal d'obscurité.

2/ Un hacheur de faisceau utilisé pour la détection synchrone.

3/ Un agrandisseur de faisceau à miroir équipé d'un trou de filtrage

5/ Un sous-ensemble polariseur permet d'obtenir une polarisation S, P ou circulaire. Il est composé de deux prismes de Glan et d'une lame 1/4 d'onde adaptée au laser utilisé.

6/ Une lame de verre non traitée réfléchit une partie du faisceau incident vers un détecteur de référence.

7/ Un miroir de renvoi amovible réfléchit le flux incident vers un monochromateur Jobin Yvon modèle HR 320, pour contrôler la longueur d'onde du laser accordable Sa-Ti

Le caisson de mesure de la lumière diffusée

Les éléments qui composent ce caisson sont

- 1/ Un périscope qui renvoie le faisceau laser de la sortie du caisson de traitement vers l'échantillon
- 2/ Un porte échantillon à 5 degrés de liberté pour l'alignement et le centrage de l'échantillon, le réglage de l'angle d'incidence et la rotation de l'échantillon sur son axe. Seule cette dernière est motorisée. Elle permet de mesurer des comportements anisotropes
- 3/ Un bras tournant d'1 m de longueur portant un détecteur silicium. Le bras est entraîné par un moteur Micro-Contrôle type UR 100 PP. L'axe de rotation du bras passe par le point d'impact du faisceau laser sur l'échantillon. Le détecteur est équipé d'une optique qui le conjugue avec ce point d'impact
- 4/ Une densité optique de 4 décades, montée sur un mécanisme basculant télécommandé, permet d'aligner le faisceau laser au début de la procédure, avant la mise en place de l'échantillon
- 5/ Un piège à lumière de type Micro-Contrôle est placé en extrémité de caisson sur l'axe du faisceau incident pour annuler la lumière parasite dans le cas d'échantillons transparents
- 6/ Un piège à lumière spéculaire est placé près de l'échantillon
- 7/ Des panneaux en nids d'abeille à mailles de 10 mm et d'épaisseur 50 mm recouvrent les parois du caisson pour bloquer toute lumière parasite
- 8/ Un mur soufflant à flux laminaire est placé sur le côté du caisson, à l'opposé se trouve une chicane optique permettant l'évacuation de l'air. Le caisson est en surpression pendant les mesures avec une classe de propreté de 100 et un renouvellement complet de l'air toutes les 10 secondes

Outre ces trois sous-ensembles, on évoque ici le dispositif de détection, les échantillons et l'informatique de commande

La détection

L'ensemble de détection est composé d'un radiomètre United Detector Technology modèle S390 et de deux Photodiodes silicium Hamamatsu ref S1336-8BK, une pour la mesure du flux incident en sortie du caisson de traitement et une, située à l'extrémité du bras, pour la mesure du flux diffusé

Quand le signal avec la détection directe devient perturbé autour des BRDF de 10^{-4} , on complète la mesure par une autre avec la détection synchrone, qui permet d'atteindre des niveaux de BRDF de 10^{-6}

Les échantillons

Les échantillons sont montés dans des supports circulaires qui acceptent des diamètres de 20, 25, 32, 35, 50 mm avec des épaisseurs de 1 à 8 mm. La surface à mesurer sur l'échantillon est placée au niveau de l'axe de rotation du bras de mesure. La monture permet de mesurer l'échantillon sous des angles rasants

Informatique de commande et d'exploitation

Elle est supportée par un PC 386. Le logiciel "Diff 5" pilote les éléments du banc et traite les mesures:

- Commande du moteur du bras de mesure
- Commande du moteur du porte-échantillon
- Commande et acquisition des mesures du détecteur
- Une imprimante et un traceur de courbes.

Le logiciel permet de rentrer les paramètres de mesure. Temps d'intégration, longueur d'onde, la polarisation, la nature de la mesure (réflexion ou transmission), l'angle d'incidence, le type de détection (directe ou synchrone), la plage et le pas angulaire de la mesure, l'éventuel arrêt autour du spéculaire. Le logiciel affiche les courbes à l'écran ou sur le traceur, et imprime les paramètres de la manipulation. Les résultats peuvent être convertis en fichiers EXCEL. 4

IV - PROCEDURE DES MESURES

Après avoir choisi le laser d'émission l'opérateur doit régler la polarisation et rentrer les paramètres de la manipulation (v. ch.III). Les mesures en réflexion se déroulent comme indiqué dans la planche 3.

On règle le détecteur à sa position de référence, face au faisceau incident (avec la densité), puis on monte l'échantillon. On actionne l'obturateur pour mesurer le signal d'obscurité. Pour les mesures à faibles flux, on ajoute éventuellement des écrans noirs pour améliorer la lumière parasite (ex. mesures des arrêtes).

Puis le bras de mesure balaie la plage de mesure (généralement 180°) en tenant compte de l'angle d'incidence affiché. Le pas de mesure est d' 1° ou $0,5^\circ$. Les mesures en réflexion sont possibles jusqu'à 1° du spéculaire. A chaque pas on enregistre le flux incident et le flux diffusé, en moyennant 100 acquisitions.

A chaque angle de mesure, l'échantillon peut tourner dans son plan pour mesurer plusieurs profils. Ceci permet de moyennner les profils sur un échantillon isotrope, ou de mesurer une anisotropie. Si l'on décale l'échantillon par rapport à l'axe de rotation, on mesurera plusieurs points de sa surface.

La procédure des mesures en transmission est identique (voir planche 4), sauf que la direction spéculaire est celle du faisceau incident. L'acquisition d'un profil au pas d' 1° dure typiquement 1/4 h.

V- TRAITEMENT DES MESURES

Le logiciel donne la BRDF $\cos\theta$ et déduit le TIS d'un profil complet à incidence normale. Mais il faut l'étalonner par une mesure de BRDF sur une référence lambertienne SPECTRALON de TIS connu (99% ou 1,4%).

Les mesures en détection synchrone ne peuvent être étalonnées ainsi. On mesure l'échantillon aussi en détection directe et on recale la mesure synchrone par la portion de courbe dans la dynamique commune.

Le logiciel exporte les mesures sous Excel. Un traitement supplémentaire ("Mirdif.xls") permet de symétriser, lisser, recalculer l'angle spéculaire, tracer les mesures et de leur ajuster un modèle polynomial ou de Harvey [Harv 89].

$$(2) \quad \text{BRDF} = K \times (\beta - \beta_0)^{-m}$$

Où β est le sinus de l'angle d'observation par rapport à la normale à l'échantillon, et β_0 le sinus de l'angle d'incidence. m vaut typiquement 1,5 à 3.

VI - PERFORMANCES

La détection directe suffit pour des BRDF de 10^{-4} . Au-delà et jusqu'à 10^{-6} , la détection synchrone est nécessaire. En détection directe, la reproductibilité et la précision relative du recalage sont de l'ordre de 5%. En détection synchrone, elles sont plutôt de 10%.

La qualité des mesures dépend beaucoup de l'homogénéité et de la propreté de l'échantillon, ainsi que de son bon positionnement.

VII - PRESENTATIONS DE QUELQUES RESULTATS

1/ BRDF de divers revêtements

Les courbes de BRDF de divers revêtements et matériaux isotropes sont données sur la planche 5. Elles vont du SPECTRALON, référence de blanc lambertien, jusqu'au MARTIN BLACK qui est le meilleur noir diffusant sur le marché. On montre aussi une peinture blanche RZ186, une surface brute en carbure de silicium PO11G (ébauche de miroir) et une anodisation chrome noir.

2/ Diffusion de miroirs en SiC

Un échantillon de miroirs en SiC recouvert d'un dépôt d'aluminium a été mesuré. Les mesures sont effectuées à différentes incidences 0 et 55° [Mazu 97]. Après traitement les résultats sont tracés suivant le modèle de Harvey, $\text{BRDF} = 10^{-4,01} (\beta - \beta_0)^{-1,71}$ avec un TIS de $1,5 \cdot 10^{-3}$ (voir planche 6).

3/ BTDF de couches minces

Les mesures de profils de diffusion en réflexion et transmission sur des Fabry-Perrot à couches minces montrent une bonne concordance entre le calcul et la mesure sur la position angulaire des pics de diffusion. C'est le cas du filtre ZnS/Cry présenté sur les planches 7 et 8 où l'on retrouve les pics de diffusion aux mêmes positions angulaires et d'un niveau très proche.

4/ Diffusion de surfaces contaminées

Une étude récente a permis de quantifier les pertes en diffusion dues aux surfaces contaminées soit au niveau moléculaire, soit au niveau particulaire pendant la vie d'un projet spatial. À titre d'exemple 2 types de résultats sont donnés ci-après.

Contamination moléculaire : mesure en réflexion d'un support en BK7 pollué avec du Z306 avec un niveau de contamination surfacique de $0,7 \cdot 10^{-6} \text{g/cm}^2$ pour 2 longueurs d'onde 514 et 840 nm. Avant contamination on a également relevé les profils de diffusion pour les 2 longueurs d'onde (voir planche 9)

Contamination particulaire : mesure en réflexion d'un support en BK7 pollué en salle blanche (poussières) avec des niveaux de contamination de 4500 ppm pour l'échantillon n° 6 et de 400 ppm pour l'échantillon n° 5. Les échantillons ont été également mesurés avant pollution. Les courbes sont présentées sur la planche 10 pour les 2 longueurs d'onde 514 et 840 nm.

Les mesures ont permis d'établir une partie des spécifications de propreté.

5/ Arrêtes

Une configuration originale du banc (planche 11-A) a été mise en oeuvre pour des mesures d'arêtes de diaphragmes: on a placé l'arête au milieu du faisceau, des écrans noirs limitant les parasites dus à la surface du diaphragme et aux défauts du faisceau. La lumière mesurée dans l'espace de transmission est due à la diffraction, la réflexion et la diffusion de la tranche de l'arête.

Les résultats de mesures sont donnés en planche 11-B. Comme seule une partie du faisceau atteint l'arête, les mesures ne sont pas normées: elles sont destinées à comparer une arête en aluminium par usinage ionique (rayon $1 \mu\text{m}$) à une arête classique (rayon $20 \mu\text{m}$). On constate qu'aux angles positifs l'arête ionique renvoie 10 fois moins de lumière et est moins sensible à la polarisation. [Mest 97] Par ailleurs la mesure n'est possible que sur des diaphragmes noircis.

6/ Kapton

La rotation de l'échantillon autour du point d'impact du faisceau incident nous a permis de mettre en évidence l'anisotropie du kapton d'épaisseur $25 \mu\text{m}$ comme le montre les courbes enregistrées en transmission sur la planche 12.

7/ Diffuseur holographique

De nouveaux diffuseurs sont apparus sur le marché, à titre d'exemple nous montrons le profil d'un diffuseur holographique en transmission à incidence nulle sur la planche 13

8/ Peintures noires

Toutes les peintures noires spatiales de la société MAP, employées pour les baffles et les revêtements thermiques, ont été mesurées en réflexion sous incidence normale à 514 nm. Les résultats sont regroupés sur la planche 14.

Les valeurs de TIS vont de 3.9% pour la peinture S2 à 6.2% pour la peinture PGNAC

VIII - CONCLUSIONS

Le banc développé par le CNES permet de répondre aux besoins des projets et des actions de recherches sur les nouveaux matériaux et revêtements utilisés en optique spatiale

Ses mesures, une fois traitées, peuvent être incluses dans une modélisation de lumière parasite

Le fonctionnement du banc sera éventuellement étendu vers l'infrarouge, selon les besoins des nouveaux projets spatiaux

BIBLIOGRAPHIE

[Harv 89] John E. Harvey "Surface scatter phenomena a linear shift-invariant process", *SPIE vol 1165 p.87* (1989)

[Mazu 97] L. Mazuray and all "Polishing process of sintered SiC optics" *Proceedings of ICSO 97*, Toulouse, France, December 1997.

[Mest 97] A. Mestreau and all "Usinage des bords de diaphragme par bombardement ionique" *Proceedings of ICSO 97*, Toulouse, France, December 1997.

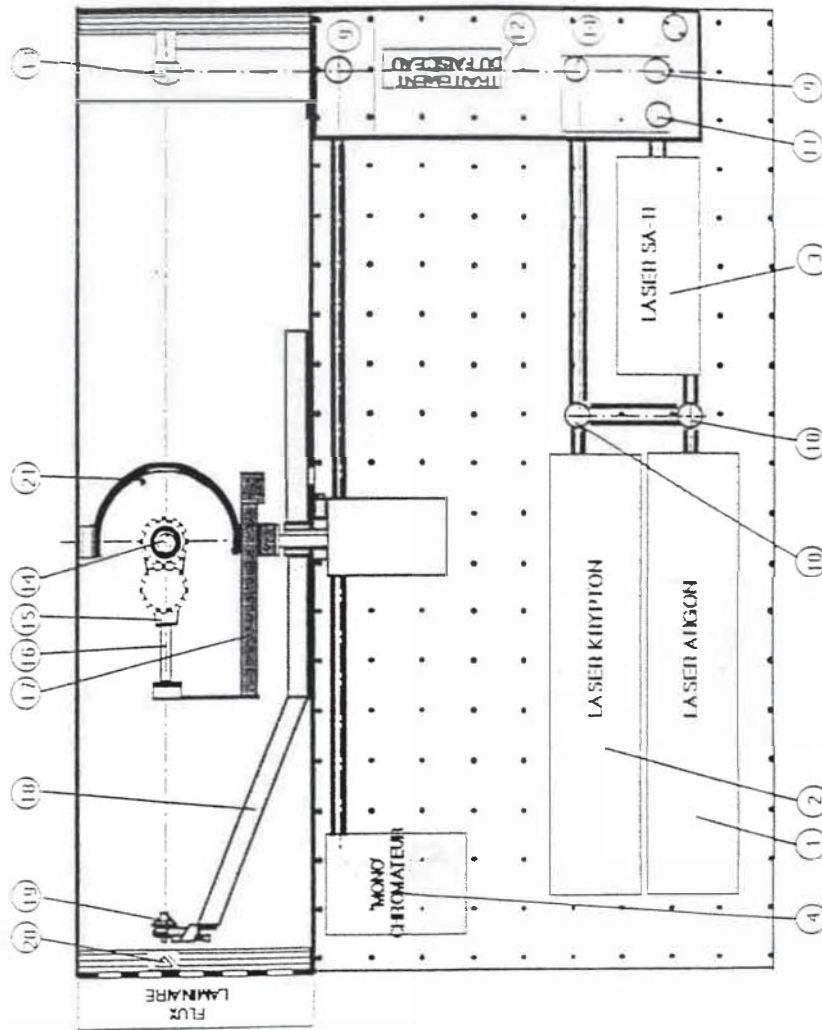
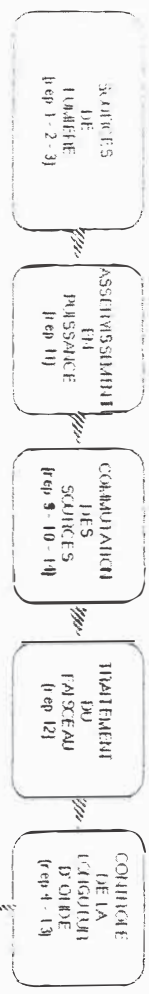
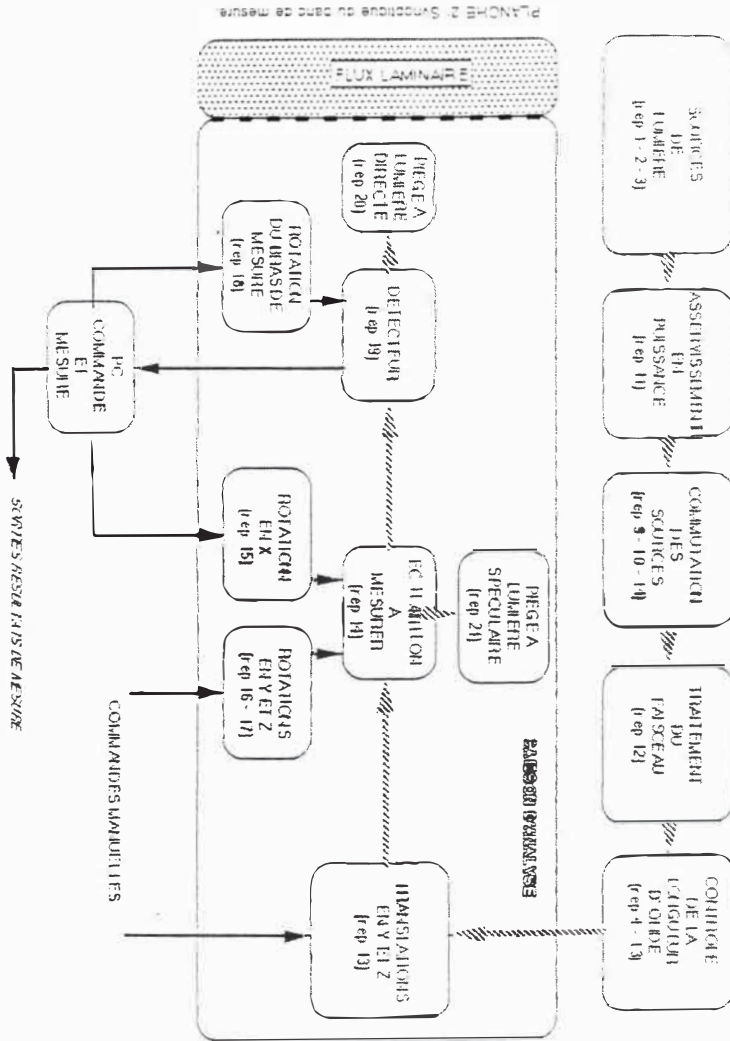


PLANCHE 1 Plan d'ensemble du banc de mesure



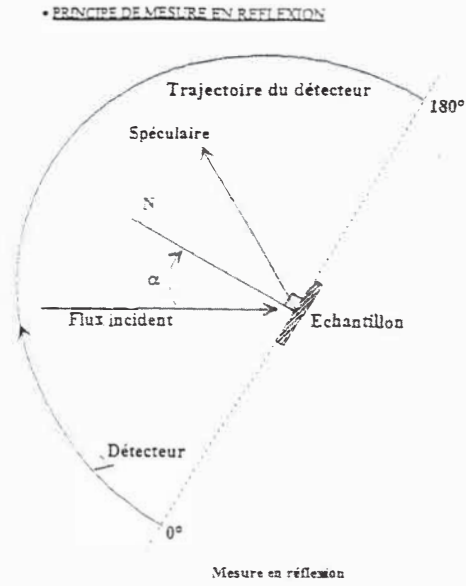


PLANCHE 3

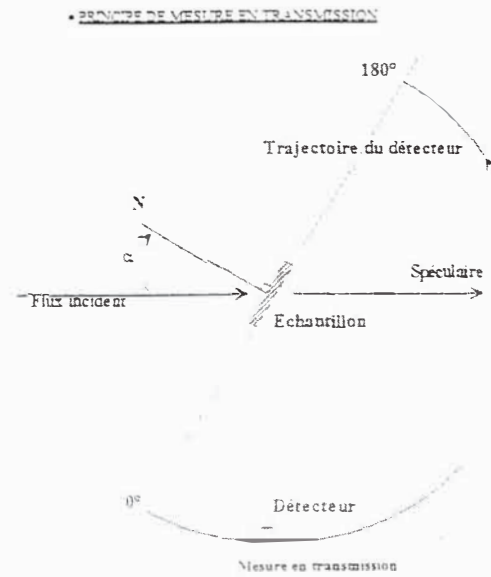
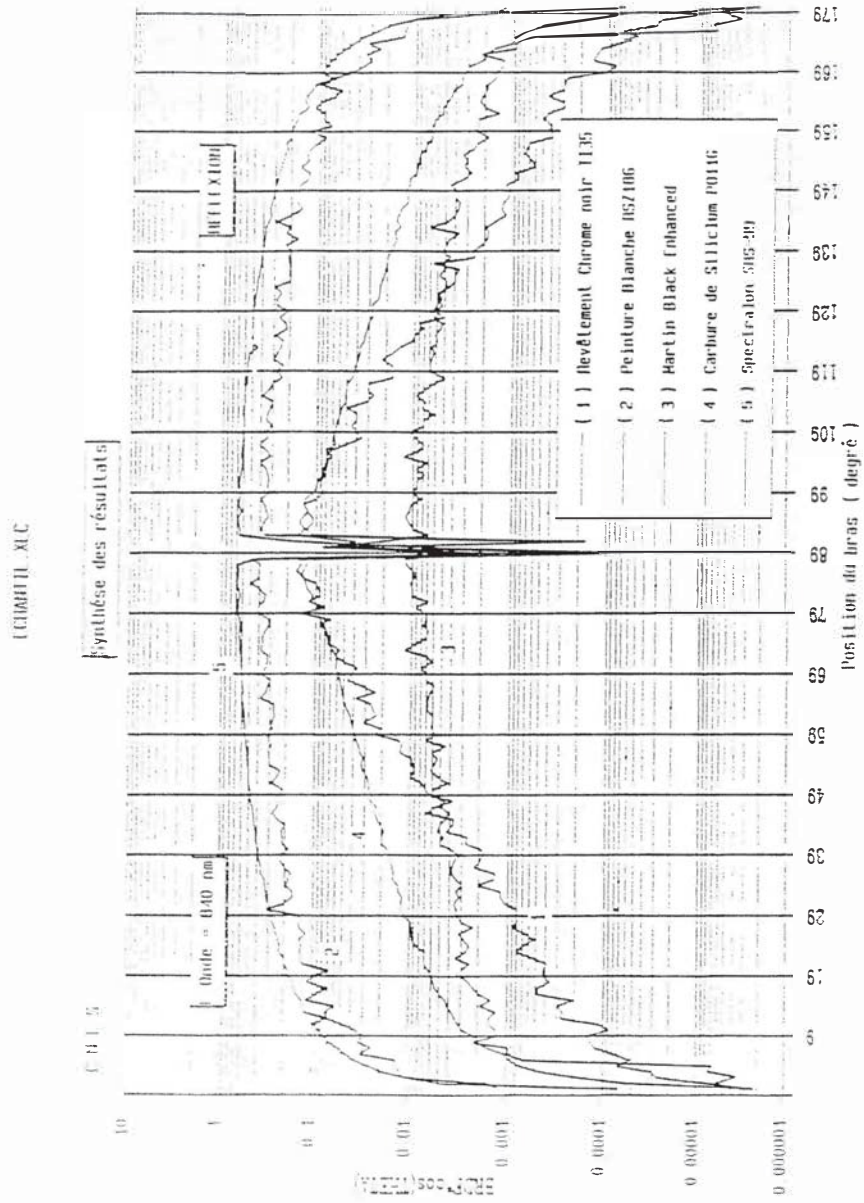


PLANCHE 4



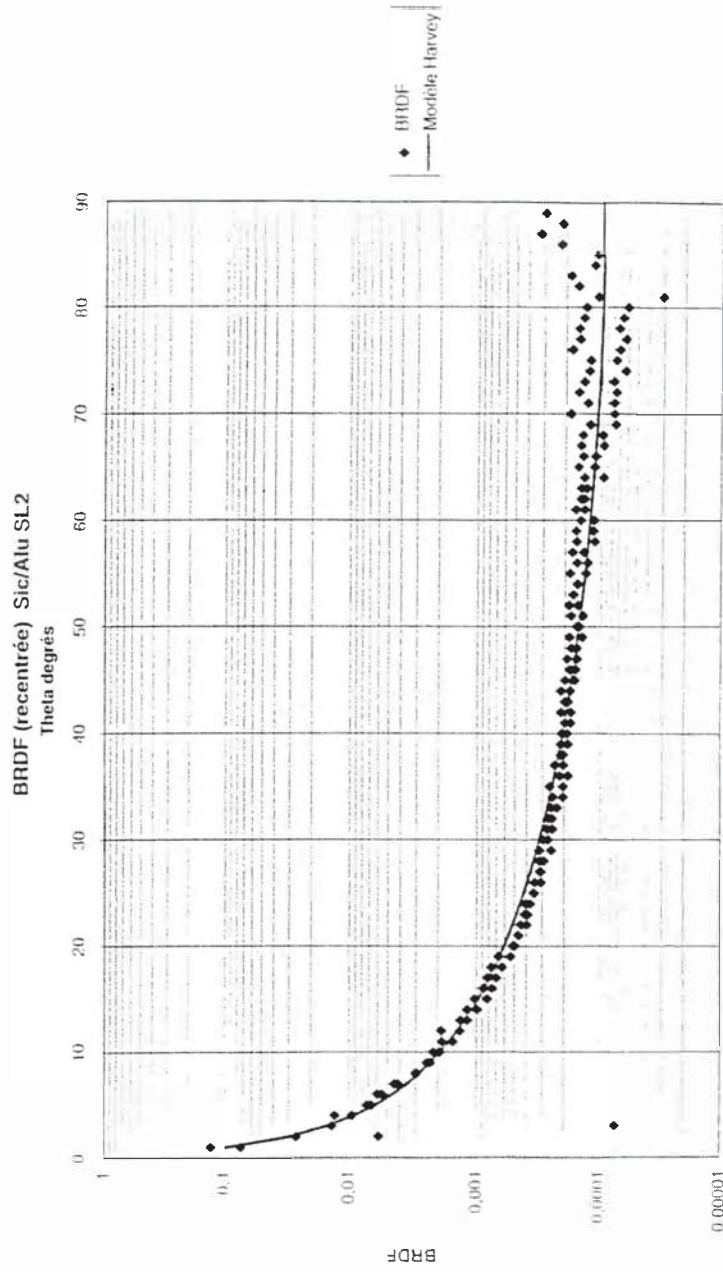
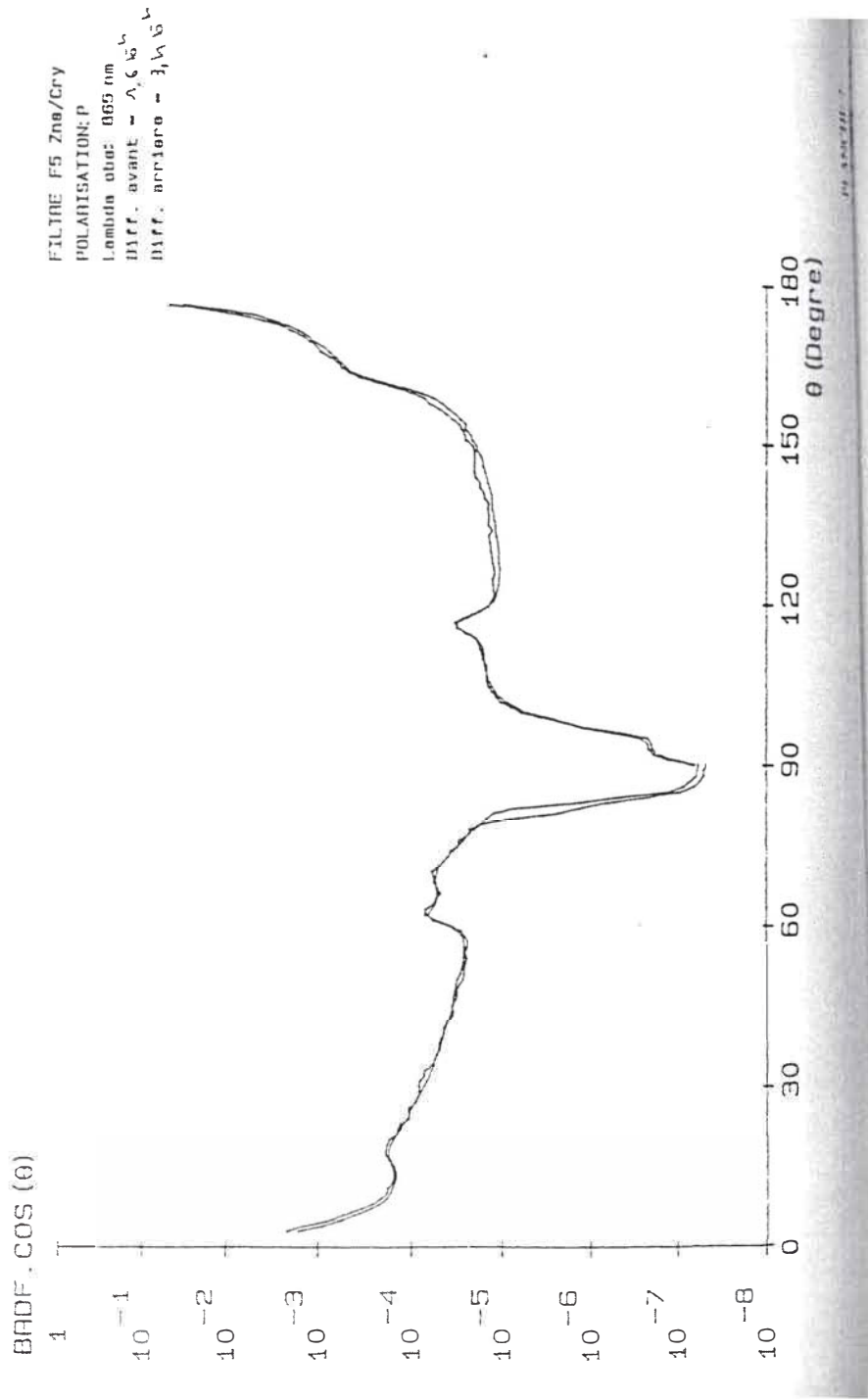


PLANCHE 6



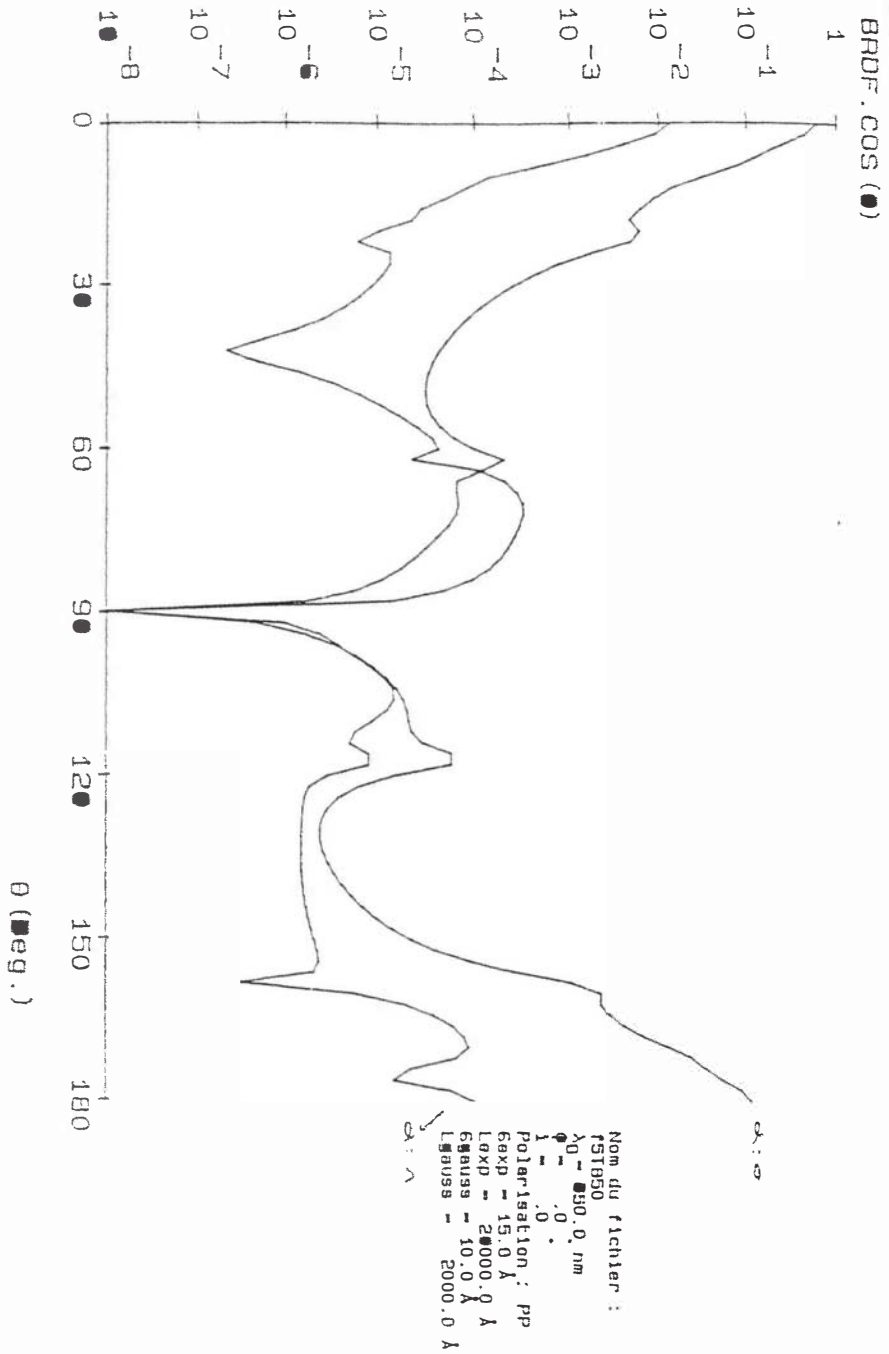


PLANCHE 8

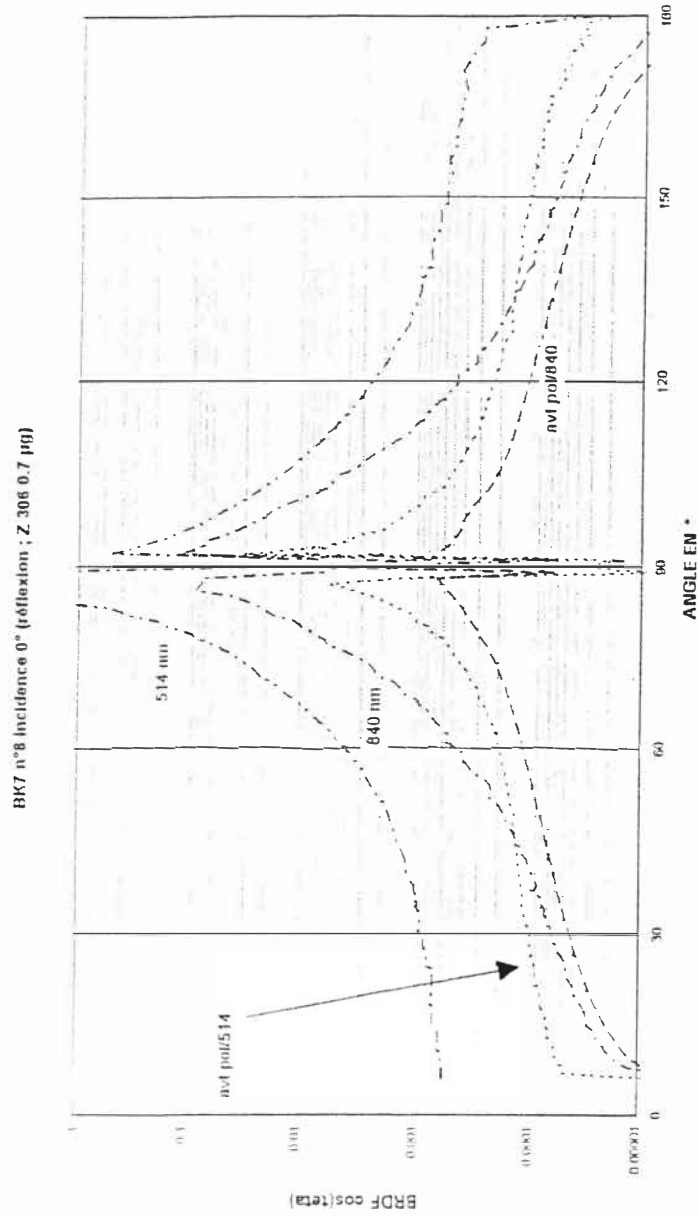


PLANCHE 9

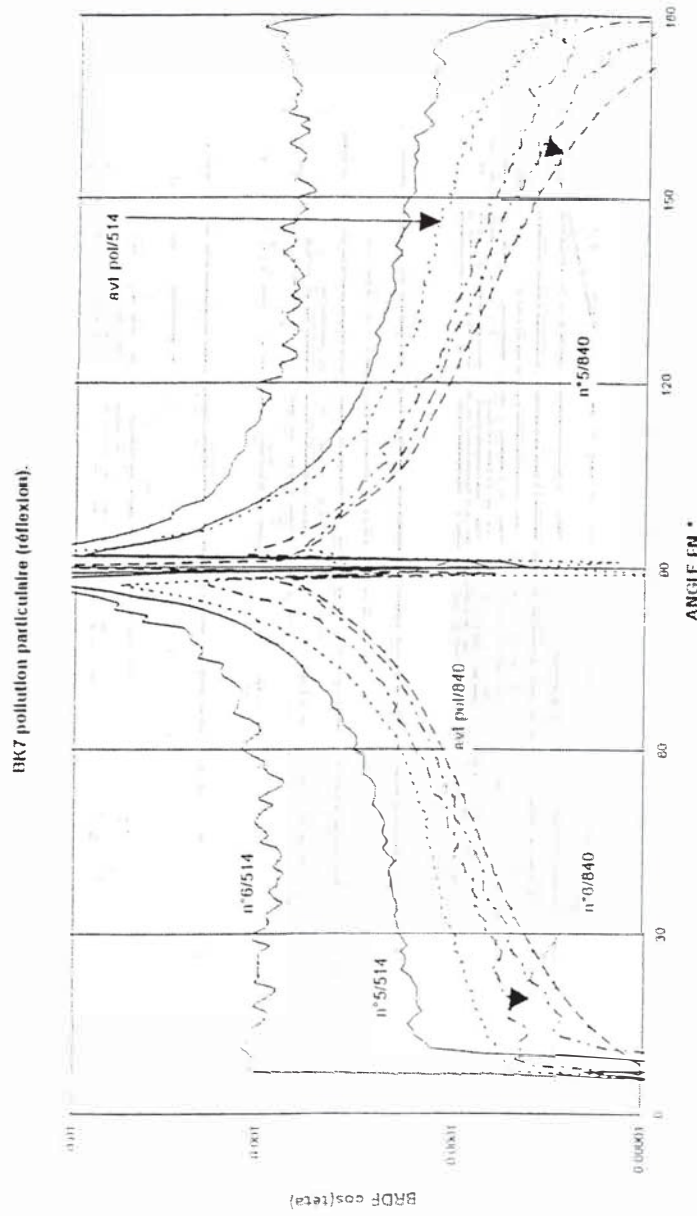


PLANCHE 15

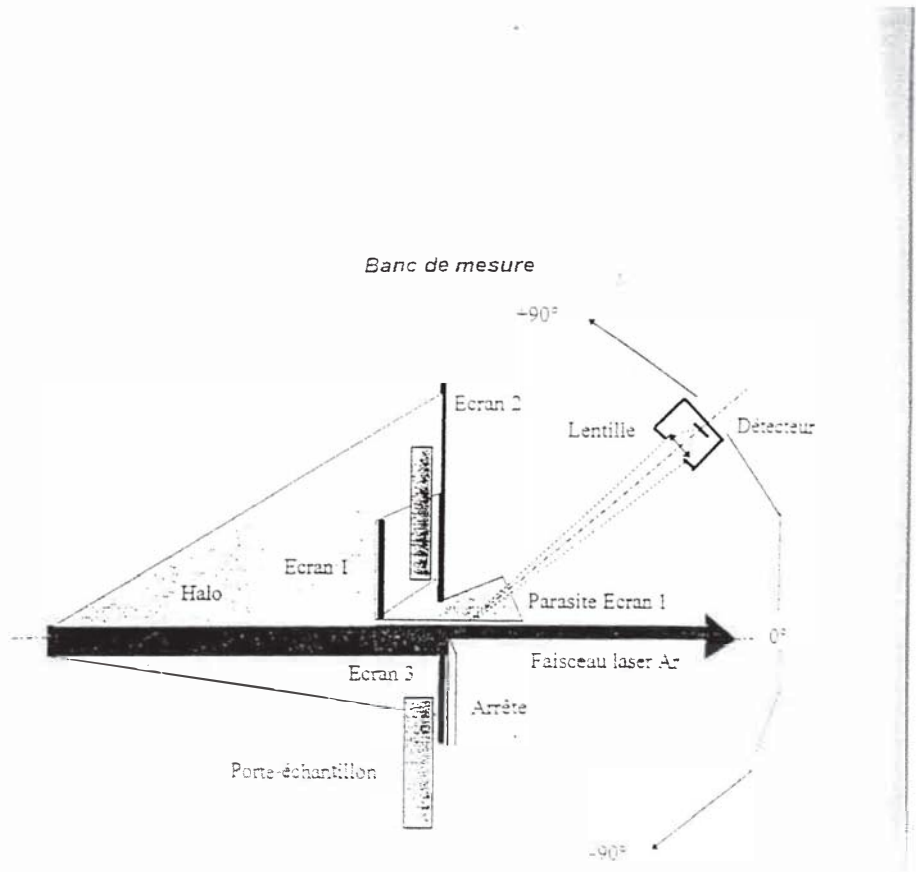
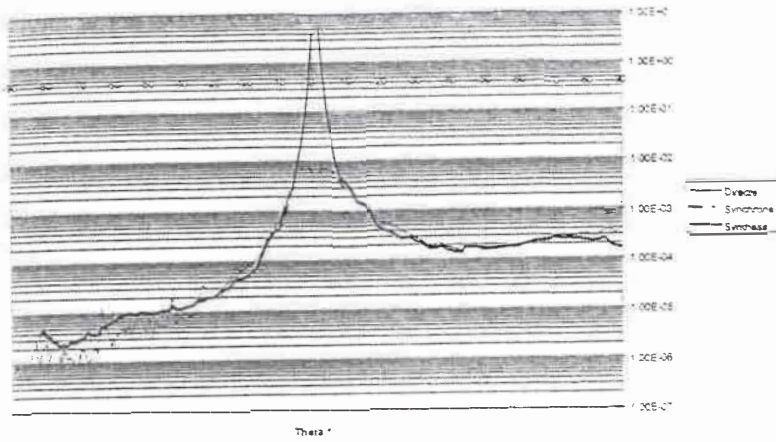


PLANCHE 11-A

Arrête ionique, polar P



Arrête classique, polar P

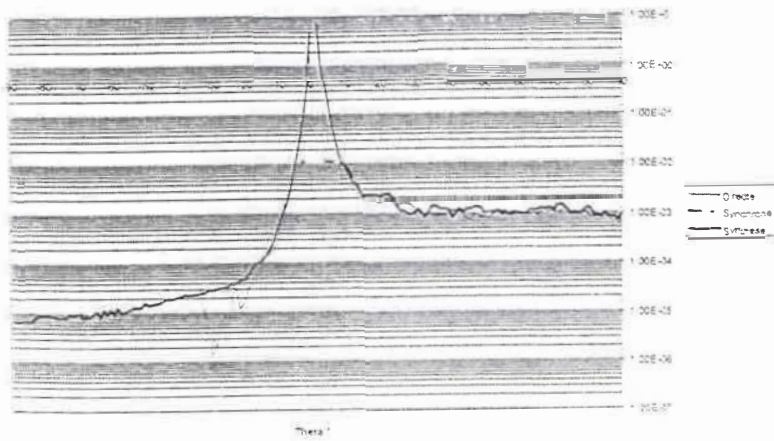


PLANCHE 11-B

