

Ultra-sons et lumière

par Patrice MARCHOU

Lycée Cabanis, 19100 Brive

Cet article décrit d'abord une expérience de visualisation de faisceaux ultra-sonores. Il présente ensuite très sommairement l'interaction acousto-optique et donne quelques exemples d'applications. L'objectif est d'une part de susciter des idées d'expériences et d'autre part d'attirer l'attention sur l'acousto-optique dont les applications sont aujourd'hui très nombreuses, mais qui reste une partie discrète de la Physique.

1. VISUALISATION DE FAISCEAUX ULTRA-SONORES

La manipulation présentée ici peut permettre d'illustrer l'étude expérimentale très détaillée des ondes sonores qui a été publiée dans le n° 649 du BUP [1].

1.1 Principe (Méthode strioscopique)

On appelle «objet de phase», un objet parfaitement transparent qui présente des variations d'indice ou d'épaisseur. La méthode strioscopique permet de transformer les variations de phase que subit la lumière à la traversée d'un tel objet en variation d'amplitude dans l'image [2], [3].

La traversée de l'objet de phase se traduit physiquement par une diffraction de la lumière. Sur le schéma (Fig. 1) le détail déphasant A de l'objet diffracte de la lumière qui est recueillie et concentrée par L_2 dans l'image A' . Pour observer cette image, on place un cache dans le plan focal de L_2 pour arrêter la lumière non diffractée. On obtient alors une image brillante sur un fond sombre.

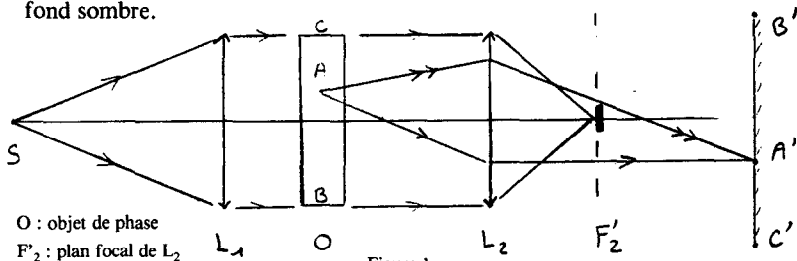


Figure 1

Un milieu dans lequel se propage une onde acoustique est soumis à des variations d'indice. C'est un objet de phase, on peut donc par la méthode strioscopique visualiser un faisceau ultrasonore.

1.2 Montage (fig. 2)

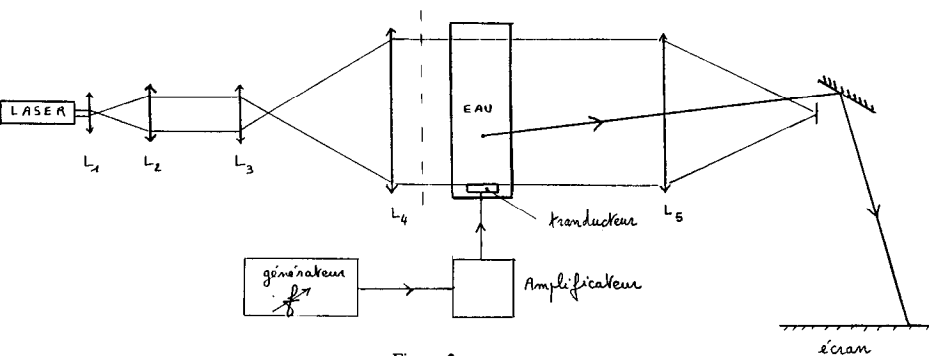


Figure 2

— Le transducteur [1] utilisé est une plaquette rectangulaire de céramique piézoélectrique ($3\text{ mm} \times 2,5\text{ cm}$) dont la fréquence de résonance se situe aux alentours de 8 MHz. Ce transducteur génère une onde ultra-sonore dans une cuve à eau.

— La source lumineuse est un laser He-Ne de 15 mW dont le faisceau est élargi par un premier doublet afocal de lentilles cylindriques

L_1 ($f_1 = 10\text{ mm}$), L_2 ($f_2 = 100\text{ mm}$)

ce qui permet d'obtenir un faisceau parallèle de section $1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. Un second doublet afocal de lentilles sphériques

L_3 ($f_3 = 35\text{ mm}$), L_4 ($f_4 \approx 450\text{ mm}$)

multiplie les dimensions du faisceau par 13 ce qui permet d'éclairer d'une façon quasi uniforme la cuve à eau sur une section de $1,3\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (diamètre de 10 cm pour L_4).

L'image de la cuve est ensuite formée sur l'écran par une lentille sphérique

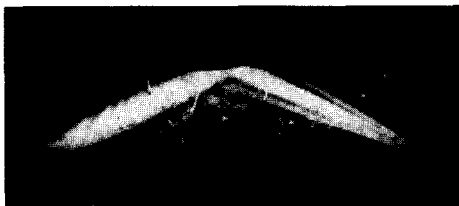
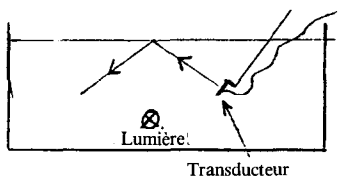
L_5 ($f_5 \approx 450\text{ mm}$)

dans le plan focal de laquelle doit être placé un cache (voir 1.1).

— L'excitation du transducteur a été réalisée par un signal électrique sinusoïdal de 8 MHz.

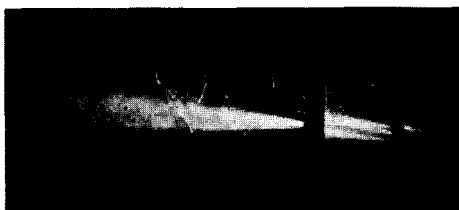
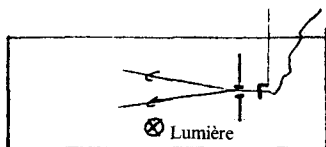
1.3 Exemples de résultats

Photographie n° 1 : Réflexion d'un faisceau ultrasonore sur un dioptre eau-air



Les «lobes secondaires» d'émission du transducteur mis en évidence dans l'article précédemment cité [1] (graphe V) 2) p. 364) sont nettement visibles sur cette photographie. Les écarts angulaires sont beaucoup moins importants car la fréquence est plus élevée et le transducteur plus «large».

Photographie n° 2 : Diffraction par une fente fine

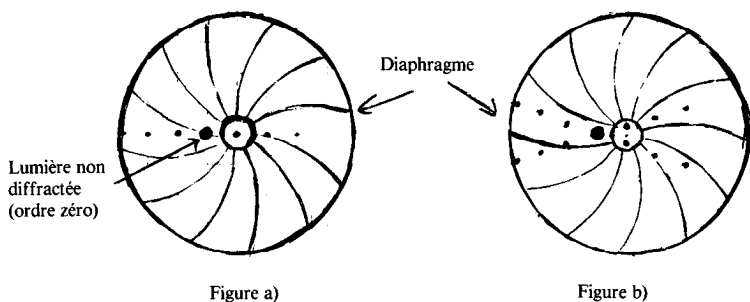


Le faisceau incident sur la fente n'est pas parallèle, mais on peut remarquer que le faisceau émergent a un angle d'ouverture plus important, ce qui prouve bien la diffraction.

Ces photographies ont été prises en faisant la mise au point sur un écran translucide constitué par une simple feuille de papier blanc. On n'obtient une image qu'après avoir correctement réglé l'angle d'incidence du faisceau lumineux par rapport à la normale à la direction du faisceau ultrasonore. Pour cela on commence par placer l'écran sur le plan focal de L_5 , ensuite on fait pivoter le transducteur jusqu'à obtenir une figure de diffraction bien lumineuse (voir 2).

Les moindres défauts de l'optique et les poussières diffractent beaucoup de lumière et voilent l'image. Pour pallier à ce problème on place un grand diaphragme dans le plan focal de L_5 et on ne laisse passer qu'un seul ordre

diffracté (filtrage optique Fig. a) et b)). L'image est moins lumineuse, puisqu'on arrête de la « lumière utile », mais plus contrastée ! Malgré cela les images présentent des parasites dus aux défauts des parois de la cuve à eau.



Attention dans le cas de la réflexion (photo 1) il faut opérer comme l'indique la figure b) sinon on ne visualise que le réfléchi ou que l'incident.

Remarque : cette expérience est certainement faisable avec du matériel différent de celui décrit ici, notamment avec une source de lumière blanche. Ses spécificités proviennent du fait qu'elle a été réalisée à partir d'un montage établi pour étudier la faisabilité d'une technique de projection d'images vidéo sur un grand écran [9].

Outre son utilisation pédagogique dans l'étude des ondes ultra-sonores elle met en évidence la diffraction de la lumière par les ultra-sons, phénomène connu sous le nom d'interaction acousto-optique.

2. INTERACTION ACOUSTO-OPTIQUE [4], [5], [6]

Nous venons de voir que cette interaction se produit lorsqu'un faisceau lumineux traverse un milieu dont l'indice de réfraction est modulé par une onde acoustique, elle se traduit par une diffraction de la lumière appelée aussi diffusion de Brillouin. On distingue deux types d'interactions connues sous les noms de Raman-Nath et de Bragg.

L'interaction Raman-Nath est analogue à la diffraction de la lumière par un réseau, elle produit plusieurs ordres. L'interaction Bragg au contraire concentre l'énergie sur un seul ordre et est comparable à la diffraction créée par un réseau blazé.

2.1 Interaction en incidence normale (Raman-Nath)

La variation sinusoïdale de l'indice engendrée par l'onde acoustique a sur l'onde lumineuse un effet analogue à celui d'un réseau de phase de pas Λ

(longueur d'onde acoustique). La figure de diffraction (Fig. 3) est symétrique par rapport à la direction du faisceau incident, on trouve les maximums pour :

$$\sin \theta_N = N \frac{\lambda}{\Lambda}$$

θ_N : angle par rapport à la direction du faisceau incident

$N = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ordre de diffraction

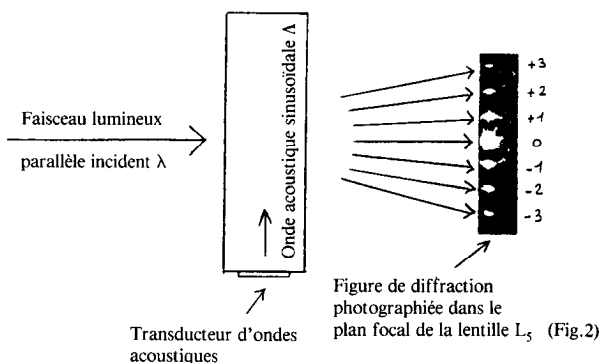
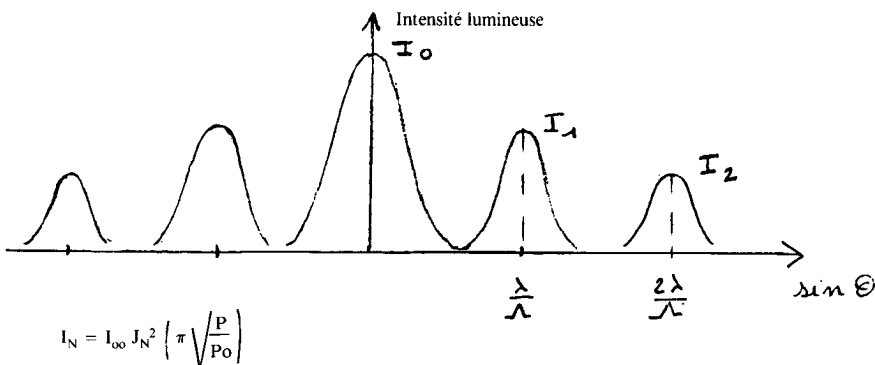


Figure 3

L'ordre zéro correspond à la lumière qui n'a pas interagi.

Le calcul montre qu'à la différence de la diffraction par un réseau l'intensité lumineuse diffractée s'exprime à l'aide des fonctions de Bessel [4].



$$I_N = I_{\infty} J_N^2 \left(\pi \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right)$$

I_{∞} : intensité lumineuse incidente

J_N : fonction de Bessel d'ordre N

P : puissance fournie par le transducteur

P_0 : puissance nécessaire pour diffracter la totalité de la lumière incidente dans le cas de l'interaction de Bragg (voir 2.2)

2.2 Interaction de Bragg

a) Présentation

Dans ce cas l'interaction se traduit par une diffraction sur un seul ordre (+ 1 ou - 1). Pour cela deux conditions sont nécessaires :

D'une part,

$$h \geq \frac{2 n v^2}{\lambda f^2}$$

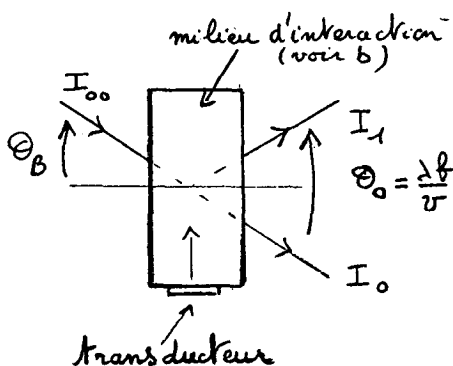
avec h dimension du transducteur parallèle à la direction de propagation lumineuse, n indice de réfraction du milieu d'interaction, v vitesse de l'onde acoustique, λ longueur d'onde lumineuse dans le vide et f fréquence de l'onde acoustique.

D'autre part, le faisceau lumineux incident doit être incliné d'un angle θ_B , appelé angle de Bragg, par rapport à la direction perpendiculaire à celle de la propagation acoustique, on démontre que :

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2 \Lambda} = \frac{\lambda f}{2 v}$$

Dans l'approximation des petits angles, l'angle de déviation est alors égal à :

$$\theta_0 = 2 \theta_B = \frac{\lambda f}{v}$$



I_{00} intensité lumineuse incidente.

I_1 intensité du faisceau dévié.

I_0 intensité du faisceau non dévié.

$$\begin{cases} I_1 = I_{00} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right) \\ I_0 = I_{00} \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right) \end{cases}$$

Le rendement de l'interaction est

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right)$$

Malgré les conditions strictes de l'interaction sous incidence de Bragg, il est possible d'obtenir une certaine bande passante (Δf) de l'interaction compte tenu de la divergence du faisceau d'ondes acoustiques :

$$\Delta f \underset{(-3 \text{ db})}{\approx} \frac{1,8 n v^2}{h f \lambda}$$

b) Fonction déviation

L'expression $\theta_o = \frac{\lambda f}{v}$ montre que si l'onde lumineuse est monochromatique on obtient une transformation fréquence acoustique - angle. L'excursion totale possible de cette déviation est :

$$\Delta \theta_o = \frac{\lambda \Delta f}{v}$$

Il existe des composants acousto-optiques spécialisés dans la fonction déviation, ils sont en général constitués par un petit cristal (Molybdate de plomb PbMoO_4 , paratellurite TeO_2) sur lequel est placé un transducteur d'ondes acoustiques.

Un tel composant permet de dévier très rapidement à volonté un faisceau lumineux qui le traverse et qui interagit dans le cristal avec une onde acoustique de fréquence variable.

c) Fonction modulation

Pour des puissances acoustiques faibles il y a proportionnalité entre l'intensité du faisceau dévié et la puissance acoustique

$$I_1 \approx I_{oo} \left(\frac{\pi^2}{2} \right) \frac{P}{P_o}$$

Cela permet la conversion d'une modulation d'amplitude de l'onde acoustique en modulation d'intensité du faisceau dévié. Les composants réalisant cette fonction sont identiques aux déviateurs (cristal + transducteur) mais dans ce cas la zone d'interaction doit être d'autant plus petite que la cadence de modulation désirée est élevée.

Remarque : Il est nécessaire dans les deux cas de prévoir un dispositif absorbant la lumière non déviée (ordre zéro). Dans les schémas qui vont suivre nous ne représenterons que le «faisceau utile».

3. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE L'INTERACTION ACOUSTO-OPTIQUE

L'interaction acousto-optique est à l'heure actuelle une des meilleures techniques pour dévier ou moduler des faisceaux lasers. Ses applications sont très nombreuses, nous nous limiterons à celles dont le principe reste relativement simple.

3.1 Projection sur grand écran

a) Projection d'images de télévision monochrome (Fig. 4)

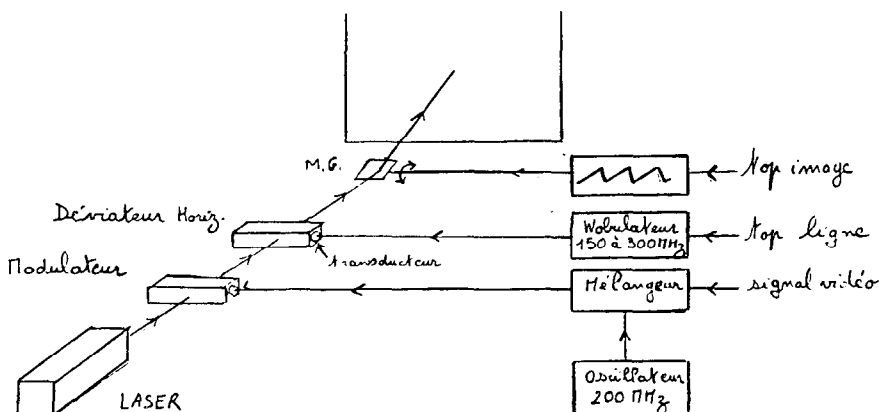


Figure 4 [5]

Le faisceau d'électrons balayant l'écran d'un tube cathodique est remplacé par un faisceau laser balayant un écran de projection classique.

* La lumière issue du laser est d'abord modulée en intensité à l'aide d'un modulateur acousto-optique : l'excitation électrique du transducteur étant modulée par le signal vidéo, l'onde acoustique générée par ce transducteur est modulée en amplitude selon ce même signal vidéo ; l'interaction acousto-optique convertit la modulation d'amplitude de cette onde en modulation d'intensité lumineuse du faisceau laser (ordre ± 1). Ceci permet de reproduire sur l'écran les différents niveaux de luminance des points d'une image.

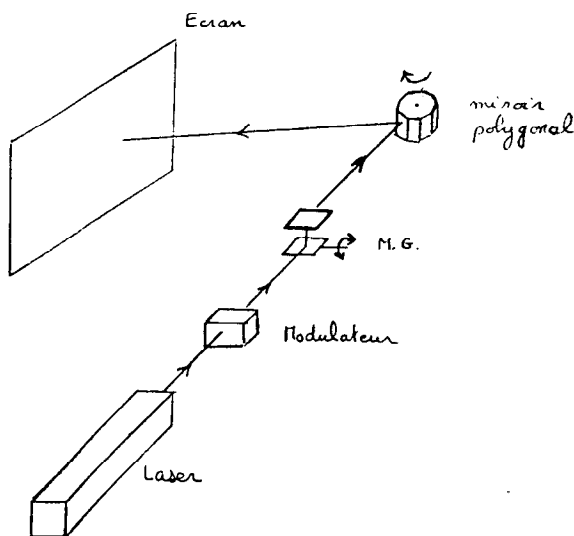
* Le rayon laser est ensuite dévié horizontalement (balayage ligne $64 \mu s$) à l'aide d'un déviateur acousto-optique, alors que la déviation verticale, plus lente, peut être réalisée à l'aide d'un miroir galvanométrique (M.G.) [5], [6].

Remarque : Un projecteur haute définition mis au point à l'Université de Valenciennes utilise, pour assurer la déviation horizontale, un miroir polygonal tournant dont la vitesse de rotation reste raisonnable grâce à l'utilisation d'une technique de projection simultanée de plusieurs lignes (Fig. 5). [7]

b) Projection d'images de télévision couleur

Elle nécessite l'utilisation de deux lasers (un laser à Argon et un laser à colorants) pour générer les trois faisceaux de couleur rouge, verte et bleue qui vont traverser séparément trois modulateurs à cristaux. La modulation est proportionnelle à chaque signal vidéo R V B ; la déflexion horizontale est effectuée par un système à miroirs tournant à très grande vitesse, puis une optique spéciale focalise les lignes obtenues sur un miroir oscillant à la fréquence de balayage vertical.

C'est le principe de fonctionnement du projecteur SD 270 de la société Dwight Cavendish qui fournit une image de plus de 5 m de base au standard classique de la télévision 625 lignes.



Dans un but de simplification les différents systèmes optiques de transports d'image n'ont pas été représentés.

Figure 5

Remarque : Ces techniques apportent un «plus» notoire dans la projection des images vidéo, mais c'est certainement dans les applications des terminaux graphiques d'ordinateurs que l'avantage du faisceau laser marque les plus grands points, tant la finesse de reproduction des détails surpasse les systèmes à faisceau cathodique généralement utilisés aujourd'hui [8].

c) Projection de logos et de textes (Fig. 6)

Une plus grande luminosité peut être obtenue en supprimant la modulation d'intensité. L'image est réalisée par la déviation horizontale et verticale du faisceau laser, les différents points de l'image étant accessibles à volonté, on utilise deux déviateurs acousto-optiques afin de permettre une commutation rapide d'un point de l'image à l'autre.

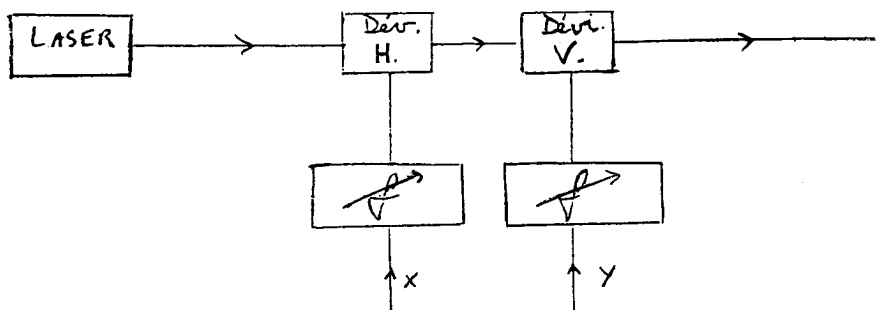


Figure 6

3.2 Imprimante ultra-rapide à laser [5], [6]

Les deux dimensions de l'image sont obtenues, par exemple, l'une à l'aide du défilement du papier et l'autre à l'aide d'un miroir polygonal tournant ou d'un déviateur acousto-optique (selon la cadence requise). Un modulateur, fonctionnant en «tout ou rien», permet de moduler l'intensité du faisceau lumineux avant sa déviation. De telles imprimantes ont des débits de l'ordre de cent pages par seconde !

Il existe bien d'autres applications de l'interaction acousto-optique notamment dans des domaines comme la technologie des lasers de puissance, la fabrication des vidéodisques, les communications par fibre optique et le traitement du signal. Domaines très spécialisés qui sortent du cadre de cet exposé.

Avant de terminer, je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire d'opto-acousto-électronique de l'Université de Valenciennes, et plus particuliè-

rement M. Bruneel qui m'a donné l'idée de cet article, MM. Torguet, Thomin et Gazalet dont les conseils m'ont été fort utiles pour la réalisation de l'expérience de visualisation et M. Bridoux directeur du Laboratoire qui a eu l'obligeance de mettre à ma disposition tout le matériel nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] R. Allard - Etude Expérimentale des ondes sonores - B U P n° 649
- [2] M. Françon - Vibrations lumineuses, optique cohérente - Dunod Université
- [3] Berty - Escaut - Marchand - Martin - Oustry - Physique pratique (optique) - Vuibert
- [4] E. Dieulesaint - D. Royer — Ondes élastiques dans les solides application au traitement du signal - Masson
- [5] R. Torguet - Etude théorique et expérimentale de l'interaction de la lumière avec des ondes acoustiques de forte puissance - Thèse d'Etat 1973, Paris VI
- [6] M.G. Gazalet - Composants acousto-optiques polychromatiques de puissance - Thèse d'Etat 1983, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
- [7] S. Carlier - Etude d'un vidéoprojecteur laser à balayage simultané de plusieurs lignes - Thèse de 3ème cycle 1985, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
- [8] Communiqué de presse Société Vidéac - 3, rue Malbousquet MC 98000 Monaco
- [9] P. Marchou - Rapport de stage de DEA d'Electronique appliquée à l'imagerie-1986, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.