Mesure de vibrations de crayon d'élément combustible sous écoulement par vibrométrie laser

P. Bouchard, J.L. Rigot, J.E. Chaix
Société Technicatome, Service TA/CAD/SDT, CEN Cadarache, B.P. No. 1, F-13115 St Paul-lez-Durance, France

1 - INTRODUCTION -

La méthode présentée dans cette note a été développée pour permettre la mesure sans contact des vibrations de crayons combustibles de centrale à eau légère dans un milieu translucide et particulièrement sous écoulement d'eau.

Les deux techniques habituellement utilisées étaient jusqu'alors :

- Les mesures par jauges de contraintes collées sur les crayons.
- Les mesures par accéléromètres placés à l'intérieur de faux crayons creux.

La première technique a pour principal inconvénient de modifier l'écoulement au voisinage du crayon instrumenté du fait de l'épaisseur de l'isolant qui protège la jauge et les fils électriques de liaisons.

Elle nécessite par ailleurs, l'utilisation de passages étanches pour sortir ces fils de la veine d'essai, et un étalonnage pour chaque point de mesure donnant l'accélération ou le déplacement en fonction de la contrainte mesurée.

En outre, l'utilisation de jauges de contraintes est peu fiable dans des écoulements d'eau à fort débit (décollement de la protection, fouettement des fils). L'effet de la pression et de la température est difficile à maitriser.

La seconde technique nécessite la fabrication d'un faux crayon instrumenté intérieurement d'où une représentativité inférieure notamment du point de vue inertie et un prix de revient élevé. Les passages étanches sont également nécessaires.

L'utilisation du vibromètre laser ne présente pas ces inconvénients.

Nous allons exposer ci-après le principe de fonctionnement du vibromètre à laser puis étudier l'application de la méthode à l'analyse des vibrations de crayons combustibles.

Les méthodes de mesure par anémomètre laser permettent d'évoquer les possibilités d'analyse du couplage fluide - structure.

2 - PRINCIPE DU VIBROMETRE LASER -

L'appareil utilisé fonctionne à l'aide d'un laser sur le principe de l'effet Doppler. L'étendue de mesures est très grande de 100 Å à 10 cm en ce qui concerne les déplacements et du continu à 120 KHz pour les fréquences.

La détection de la fréquence Doppler est réalisée par hétérodynage optique sur un élément photodétecteur. Celui-ci reçoit la lumière réfléchie ou diffusée par l'objet dont on veut mesurer la vibration. La fréquence Doppler étant proportionnelle à la vitesse, c'est celle-ci qui est mesurée.

2.1 - Fonctionnement -

L'effet Doppler Fizeau est la variation apparente de fréquence d'une onde entretenue émise par une source en mouvement relatif par rapport à un observateur. (cf. fig. 1)

Une onde lumineuse ou réfléchie par un objet en mouvement est décalée en fréquence par l'effet Doppler - Fizeau. Ce décalage de fréquence est appelé : "Fréquence Doppler".

$$f_D = f_i - f_d = \frac{1}{\lambda_i} (\vec{e_d} - \vec{e_i}) \vec{V} \qquad (1)$$

Soit en écrivant de façon algébrique

$$f_D = \frac{1}{\lambda_i} \; 2 \sin \frac{\theta_i}{2} \; V \qquad (2)$$

$\vec{e_d}$ vecteur vitesse de l'onde diffusée

$\vec{e_i}$ vecteur vitesse de l'onde incidente

$\vec{V}$ vecteur vitesse

On peut donc écrire : $V = \dfrac{f_D \lambda_i}{2 \sin \frac{\theta_i}{2}}$ (3)

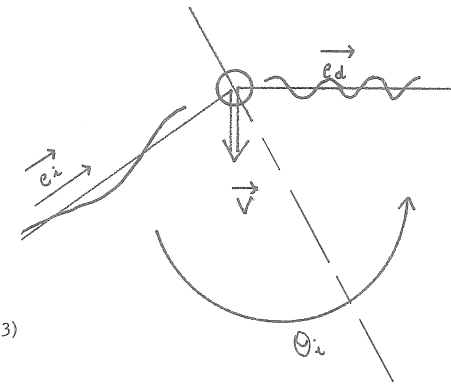


Figure 1

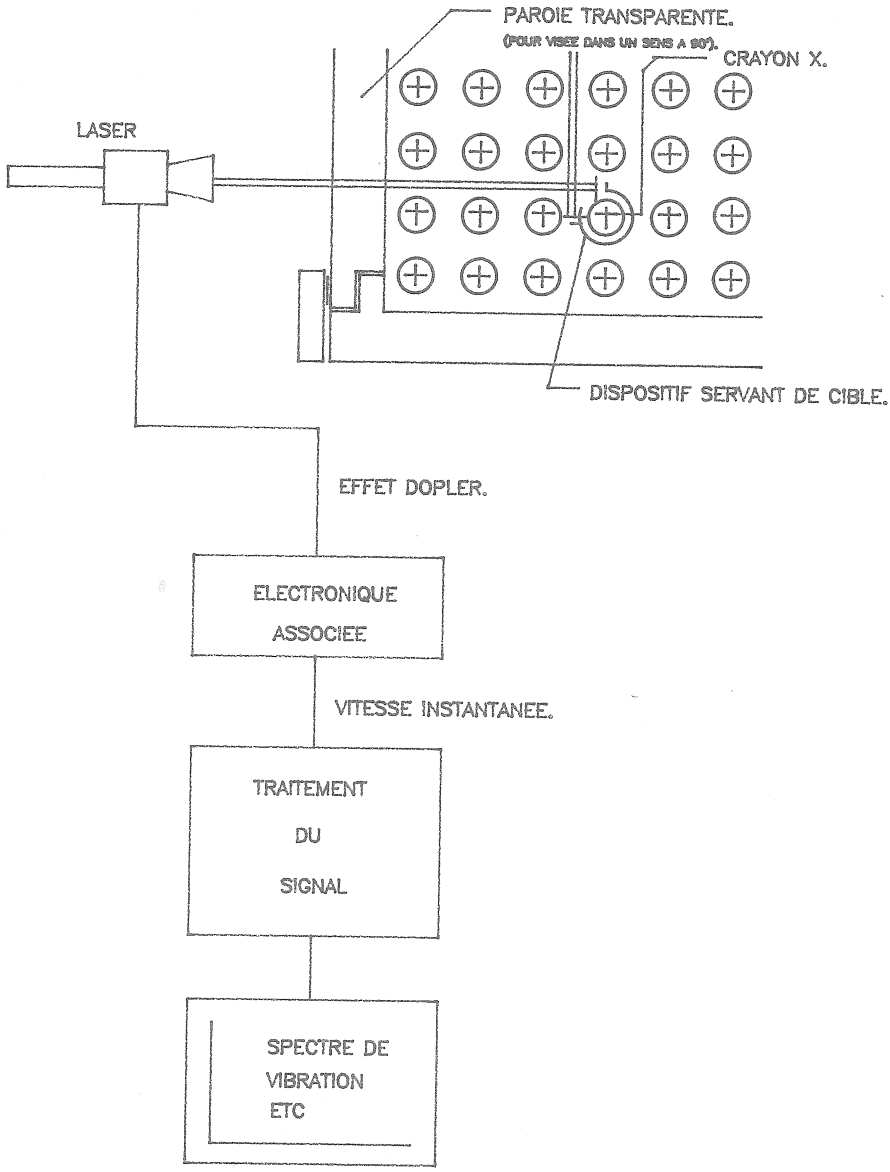
Il est possible d'en déduire que :

1/ la relation entre la vitesse de l'objet et la fréquence Doppler est linéaire et proprotionnelle.

2/ la sensibilité et la précision de la mesure de la vitesse ne sont fonction que de la valeur des constantes λ_i et θ_i. Aucun étalonnage n'est nécessaire.

3/ l'indice du milieu traversé n'intervient pas.

La méthode de mesure de la fréquence Doppler fait appel à l'hétérodynage optique. La soustraction de la valeur de la fréquence diffusée et de la fréquence incidente est mesurée par un appareillage photoélectrique.


PAROIE TRANSPARENTE.
(POUR VISEE DANS UN SENS A 90°).
CRAYON X.
LASER
DISPOSITIF SERVANT DE CIBLE.
EFFET DOPLER.
ELECTRONIQUE ASSOCIEE
VITESSE INSTANTANEE.
TRAITEMENT DU SIGNAL
SPECTRE DE VIBRATION ETC

- fig 2 -

Principe de mesure (fig. 2)

La société DISA a commercialisé un ensemble composé de :

- un laser hélium néon de 5 mV

- d'une unité optique qui permet de diriger le rayon sur l'objet dont on veut mesurer la vitesse. Le faisceau émis par le laser est dédoublé et polarisé de telle manière que la lumière réfléchie, combinée à une partie de la lumière émise puisse exciter des cellules photoélectriques. Une modulation du faisceau laser réalisée par une cellule de Brag, permet d'accéder à un signe de la vitesse (création d'une composante continue connue autour de laquelle évoluera la mesure).

On notera que ce dispositif permet de connaitre en fait la mesure de la vitesse relative du vibromètre par rapport à la cible.

- d'une électronique de traitement du signal constitué d'un filtre suiveur donnant une image analogique de la vitesse.

Caractéristique du vibromètre

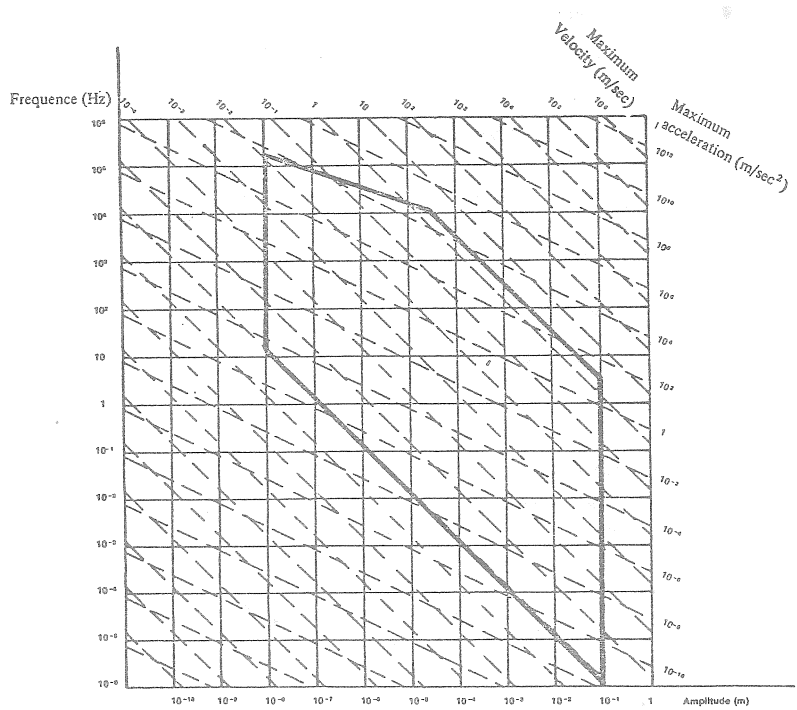


Figure 3

3 - APPLICATION -

L'utilisation du vibromètre laser est possible toutes les fois qu'un accès optique existe pour viser la pièce à analyser.

La méthode de mesure se prête particulièrement bien à l'étude des vibrations de petites pièces d'accessibilité délicate, la perturbation due à la masse ajoutée de l'accéléromètre n'existe pas. Les mesures sous écoulement sont grandement facilitées, ce système de mesure ne générant pas de trainée. La technique de mesure laser est par conséquent tout à fait adaptée à l'analyse du comportement vibratoire de crayon d'un assemblage combustible dans une veine hydraulique.

3.1 - Installation d'essais -

Les essais décrits ci-après ont eu lieu sur des assemblages combustibles analogues à ceux utilisés dans les PWR 900 français. L'installation hydraulique permettait de faire circuler de l'eau déminéralisée à 40 °C et à 5 bar. Les visées laser étaient réalisées à travers des hublots en plexiglass.

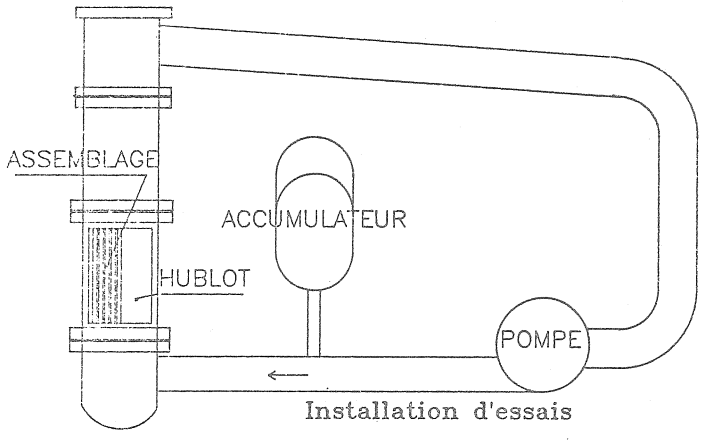


Figure 4

3.2 - Traversées optiques -

On aura noté que la méthode de mesure de fréquence Doppler est indépendante du milieu dans lequel se propage l'onde lumineuse.

Si au cours des opérations en air, envoyer le rayon incident sur une surface dépolie diffusante est suffisant, l'accès à des pièces derrière un écran en verre ou en plexiglass nécessite d'ajuster la position de l'optique de réception sur la trajectoire du rayon réfléchi.

Nos essais ont porté sur la qualification d'une bonne trajectoire optique qui évite les réflexions parasites dues aux dioptres inter-indices.

Il est tout à fait possible de mesurer les vibrations d'un crayon de première rangée suivant deux directions perpendiculaires (cf. fig. 5a).

Des amplitudes de vibrations de l'ordre de 1 mm ont été mesurées sans problème particulier.
Les crayons de deuxième rangée sont également accessibles optiquement (voir fig. 5b).

Pour un angle α d'environ 40°, on mesure de façon satisfaisante les vibrations du crayon Y par réflexion sur la génératrice.

Des amplitudes de l'ordre de 1 mm ont été mesurées.

Pour analyser les vibrations de crayons situés plus à l'intérieur de l'assemblage il est nécessaire d'avoir recours à un réflecteur artificiel.

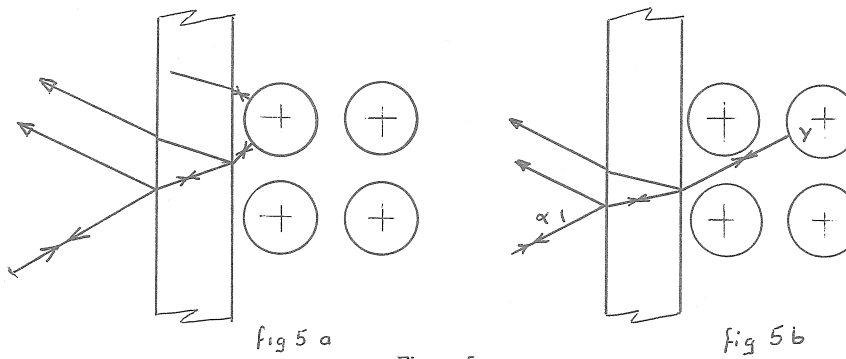


Figure 5

3.3 - Obstacle de mesure -

En raison de la diminution de sensibilité due aux traversées des hublots il a été nécessaire de concevoir des dispositifs permettant de travailler sur un rayon réfléchi sur une cible optique et non sur un rayon diffusé.

Un dispositif mécanique sert de cible au rayon laser et renvoie ce rayon décalé en fréquence vers l'optique de réception.

Ce dispositif se fixe sur le crayon concerné et permet l'accès visuel entre deux rangées de crayons sur cette cible.

Les cibles utilisées sont à une ou deux directions à 90°. Elles se composent d'un anneau métallique autoserrant, collé ou soudé sur le crayon, et comportent un ou deux pliages en bout.

On obtient ainsi des surfaces rectangulaires visibles entre deux rangées de crayons et perpendiculaires à cet axe visuel. Elles servent de cibles au rayon laser.

Pour les études effectuées sur les assemblages PWR 17 X 17 ; ces cibles ont été polies et recouvertes d'une couche d'or réfléchissante.

Les anneaux sont fabriqués en zircaloy afin qu'ils puissent être soudés sur la gaine de crayon.

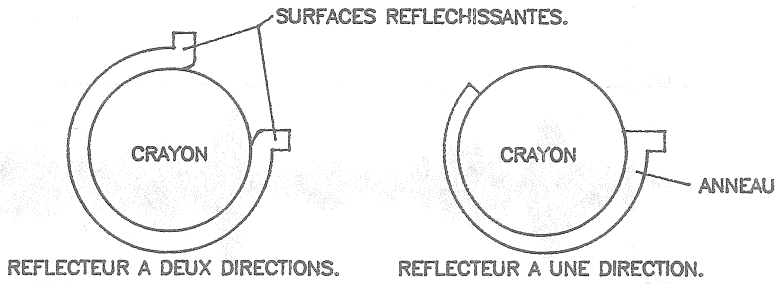


Figure 6

3.4 - Traitement du signal -

3.4.1 - Analyse temporelle -

L'assemblage combustible est soumis à un débit d'eau variable qui permet de rechercher les éventuelles instabilités vibratoires des crayons combustibles.

L'analyse du signal vitesse permet de se rendre compte que l'excitation du crayon ne s'effectue pas de manière continue, il vibre par bouffée. (fig. 7)

Les fréquences d'oscillation fondamentales du crayon sont aisément discernables. L'analyse décrite ci-après l'explicite mieux.

L'analyse temporelle permet de bien visualiser les mouvements du crayon lorsqu'il y a couplage fluide structure tel qu'il aille choquer les voisins (fig. 8).

Il est à remarquer la qualité du signal laser par rapport à celui issu de jauges de contraintes par exemple.

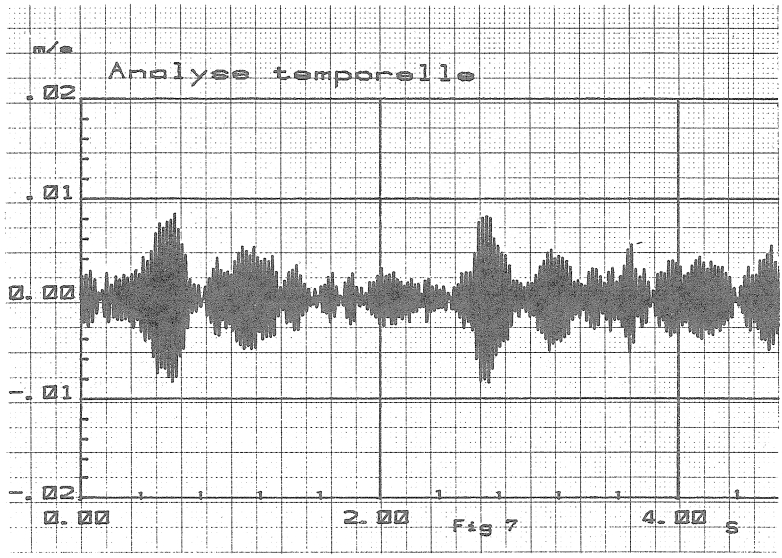

m/s
Analyse temporelle
.02
.01
0.00
-.01
-.02
0.00
2.00
4.00
s

Fig 7

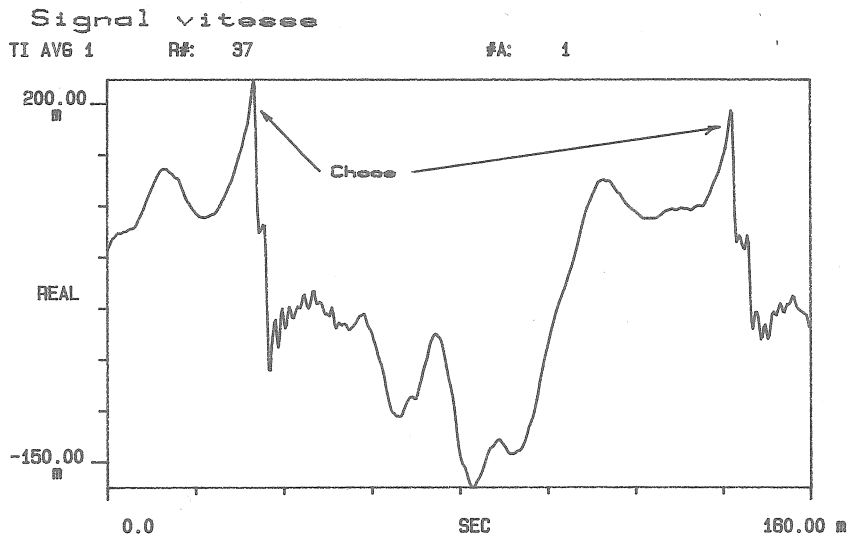

Signal vitesse
TI AVG 1
R#: 37
#A: 1
200.00
m
Chocs
REAL
-150.00
m
0.0
SEC
160.00 m

Fig 8

3.4.2 - Analyse fréquentielle -(fig. 9)

L'assemblage combustible est placé dans la veine d'essais. Le signal vitesse instantané délivré par le vibromètre est traité par l'analyseur de Fourrier.

En raison de l'instabilité de l'écoulement et de la durée de calcul de l'analyseur il est indispensable de réaliser une moyenne des amplitudes sur un grand nombre de valeurs (64). L'information fournie est alors la vitesse efficace moyenne à la fréquence considérée et une intégration numérique permet d'accéder au déplacement efficace.

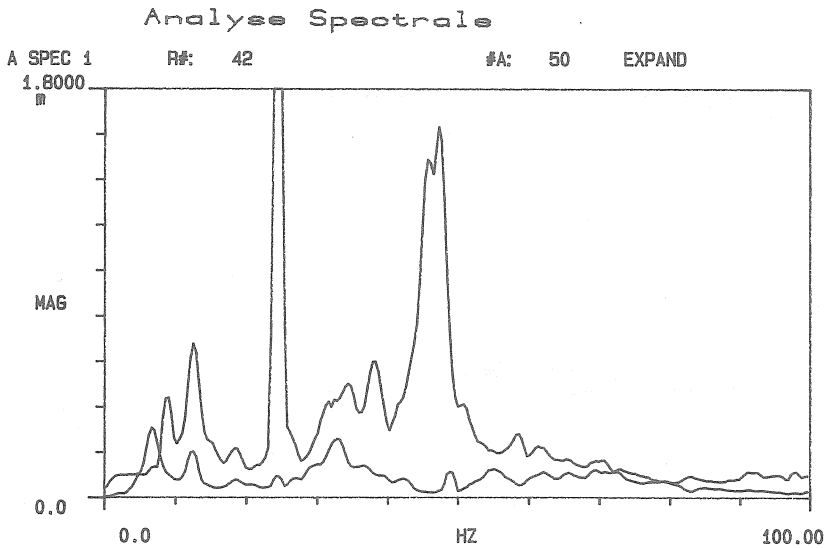


Figure 9

4 - ASSOCIATION ANEMOMETRIE - VIBROMETRIE LASER -

4.1 - Anémométrie laser -

Il est possible de connaitre la vitesse du fluide au voisinage des crayons combustibles à l'aide d'un anémomètre laser.

Le principe de la mesure repose également sur la détection de la fréquence Doppler qui caractérise la lumière diffusée par une particule portée par le fluide.

4.2 - Application -(fig. 10)

L'étude des vibrations de crayons combustibles à la périphérie du coeur sont soumis à l'excitation d'un jet transversal.

Les méthodes évoquées ci-dessus permettent de connaitre la cartographie de vitesse du jet transversal à l'aide de l'anémométrie à laser. Les vibrations du crayon peuvent être connues à l'aide de 2 vibromètres partant selon deux directions différentes, le traitement temporel assurant une représentation spatiale du déplacement du crayon.

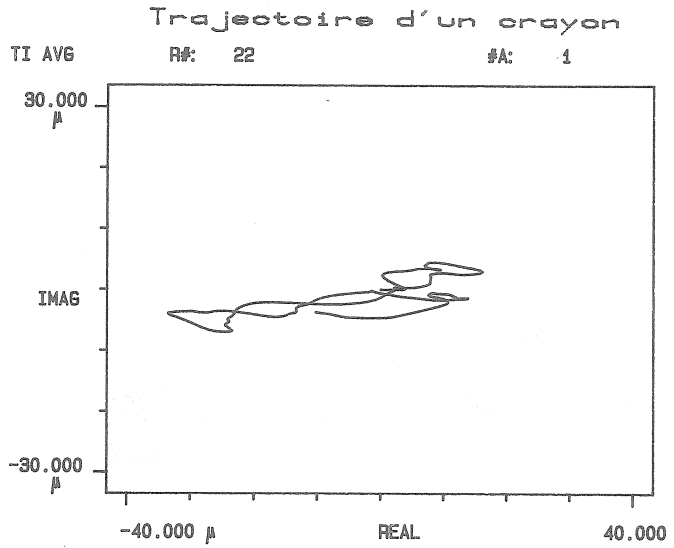


Figure 10

/1/ J.C Beteille "Mesure optique desvibrations par laser" - DISA Electronique SARL.